



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA  
FACULTAD DE INGENIERIA

"MOVIMIENTO EN EL PLANO HORIZONTAL  
EN EL VALLE DE MEXICO  
DEBIDO A SISMOS"

**T E S I S**  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
**MAESTRO EN INGENIERIA**  
(ESTRUCTURAS)

**PRESENTA**  
**CARLOS EDUARDO QUIROGA CUELLAR**

DIRECTOR: DR. EDUARDO REINOSO ANGULO

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO 2003





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## Dedicatoria

A Dios por brindarme un camino lleno de oportunidades y gente valiosa.

A mis padres Eduardo y Carmen por su gran apoyo, comprensión y paciencia.

A mi hermana Sandra Rosio por su gran apoyo y comprensión.

A todas aquellas personas que me han brindado su apoyo incondicional.

Autorizo a la Dirección General de Estadísticas de la  
UNAF a diseñar en forma electrónica e imprimir y  
controlar de mi trabajo recopila  
NOMBRE: CARLOS EDUARDO QUIROGA  
QUELLAR

FECHA: 11/03/2003

FIRMA: Carlos E. Quiroga C.

## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional Autónoma de México, al Posgrado en Ingeniería y a mis profesores que contribuyeron a lograr mi objetivo.

A la Dirección General de Estudios de Posgrado por el apoyo económico brindado durante estos dos años de estudio.

Al Instituto de Ingeniería por su apoyo en este trabajo.

A mi tutor y director de tesis Dr. Eduardo Reinoso Angulo a quien agradezco enormemente su tiempo, paciencia, asesoría y apoyo brindados en este trabajo.

A los Doctores Mario Ordaz Shroeder, Sonia Elda Ruiz Gómez, Carlos Reyes y Francisco Sánchez Sesma por la revisión hecha a este trabajo.

A mis compañeros de maestría, gracias por su amistad.

# CONTENIDO

<b>Introducción</b>	<b>i</b>
<b>1. Sismicidad en México</b>	<b>1</b>
1.1 Características del Valle de México	1
1.2 Factores que influyen en el movimiento sísmico del Valle de México	2
1.2.1 Fuente sísmica	2
1.2.2 Trayectoria	3
1.2.3 Efectos regionales	3
1.2.4 Efectos locales	3
1.3 Sismos en México	4
1.4 Red acelerométrica del Valle de México	5
1.5 Estado preliminar de los datos	7
<b>2. Movimiento sísmico y dirección de la energía en el Valle de México</b>	<b>10</b>
2.1 Movimiento de una partícula en el plano horizontal	10
2.2 Energías mínima y máxima, rombos de energía para periodos del suelo	14
<b>3. Movimiento del suelo dentro del plano horizontal en el Valle de México para sismos representativos</b>	<b>22</b>
3.1 Sismo del 15 de junio de 1999	23
3.2 Sismo del 19 de septiembre de 1985	35
3.3 Sismo del 14 de septiembre de 1995	42
3.4 Tendencia de la energía debido a efectos de sitio mostrada en las estaciones SC y CD en suelo blando del Valle de México	51
<b>4. Energía sísmica, su variación y efectos ortogonales</b>	<b>64</b>
4.1 Variación de la energía en el plano horizontal	64
4.2 Composición ortogonal de la energía	66

## INTRODUCCION

El diseño de una estructura envuelve una gran cantidad de variables demandan conocimiento, aún no muy claro en algunos campos como es el caso del Movimiento del valle de México.

El movimiento suelo en un sismo involucra tres direcciones, dos horizontales y una vertical, puesto que el movimiento horizontal en el caso zona de lago del Valle de México es substancialmente mayor comparado con el vertical, hace que este no sea tenido en cuenta en el diseño dinámico de estructuras. ¿Ocurrirá esto siempre ? Esta serie de simplificaciones que en realidad son muchas, se presentan debido a que hasta el momento nos hace falta mucho por estudiar en áreas que para nuestro interés son de gran importancia. Entre mas se conozca el comportamiento de los materiales, el comportamiento de sus combinaciones, la respuesta de sus configuraciones estructurales, el comportamiento del suelo sobre el cual cimentamos, la forma en que éste transmite la energía a las estructuras; en la medida en que conozcamos mas estos comportamientos, podremos brindar una mayor seguridad en cuanto al desempeño estructural.

Hasta el momento se utiliza una simplificación para la respuesta sísmica del suelo, esta involucra un 30% en una dirección mientras el 100% actúa en la dirección ortogonal; se ha visto que esta simplificación brinda resultados aceptable en suelo firme, pero en el caso de suelos blandos no describe en buena medida la forma en que el suelo puede transmitir sus respuestas sísmicas. Según investigaciones (Valdez González, 1999), para una gran cantidad de estructuras este valor de 30% hipotético es inferior al determinado, considerándose por tanto que las reglas que combinan los efectos sísmicos ortogonales de acuerdo a un porcentaje fijo, resultan poco realistas.

En este trabajo, mediante el uso de algunos procedimientos para el estudio del comportamiento del suelo como lo son los rumbos de energía, historia de respuesta en el tiempo y espectros de respuesta, se pretende buscar patrones de comportamiento de la energía en el Valle de México con el fin de tener una idea un poco más clara de la respuesta que éste presenta ante la incidencia sísmica. También se muestra el comportamiento del suelo para variar direcciones ortogonales dentro del plano horizontal en concordancia en el tiempo para el Valle de México, con el fin de apreciar su comportamiento para los instantes críticos presentados durante la excitación sísmica.

## CAPITULO I

### Sismicidad en México

#### 1.1 Características del Valle de México

El Valle de México es una extensa zona de aproximadamente 110 km en sentido norte sur y 80 km en sentido este oeste, en el se presentan altitudes que van desde 2236 m.s.n.m. hasta 5230 m.s.n.m. El Valle hasta hace unos 500 años encerraba los lagos de Zumpango, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Chalco, los cuales hoy día con el continuo proceso de drenaje, han desaparecido a tal punto que solo se cuenta en la actualidad con pequeñas zonas de lago en Xochimilco, Tláhuac y Texcoco. Este proceso de drenaje a convertido gran parte del valle en un terreno blando de material lacustre, sobre el cual se encuentran enclavadas gran cantidad de estructuras de la Ciudad de México.

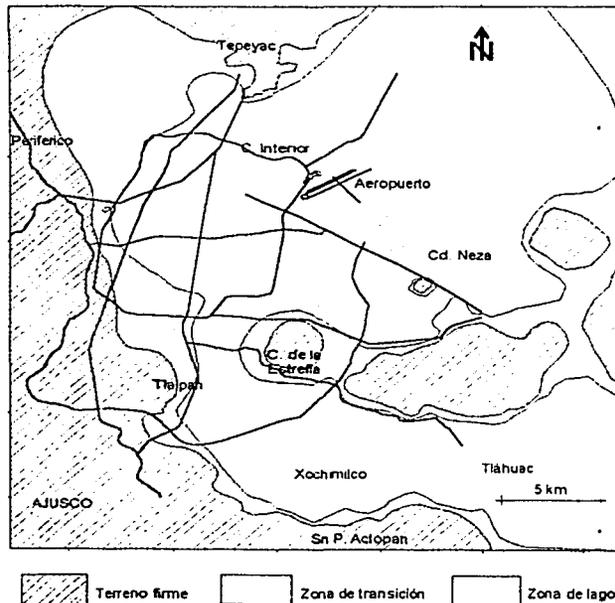


Figura 1.1 Zonificación del Valle de México

La microzonificación del Valle de México comienza con los trabajos de Nabor Carrillo en 1948 donde se logran conocer las propiedades del subsuelo en la zona céntrica de la ciudad. En la actualidad se conoce que el Valle se encuentra dividido en tres zonas (figura 1.1) que son: zona I, llamada zona firme o de lomas, ubicada en las partes más altas de valle y formada por suelos de alta resistencia, zona III o zona de Lago, formada por material blando y compresible cuyo origen es el drenado de los lagos allí antes existentes y zona II o de transición, la cual posee características entre las dos zonas anteriores.

Las estructuras construidas sobre el Valle de México enfrentan dos tipos de problema que no son aislados, estos son: primero, el problema de encontrarse construidas sobre un terreno blando y compresible, con lo cual sufren de hundimiento en sus cimentaciones, que dan origen a daños estructurales debidos a asentamientos diferenciales en su cimentación; el segundo problema es la respuesta que el terreno blando del Valle presenta ante la incidencia sísmica; el Valle presenta grandes amplificaciones del movimiento sobre todo en la zona de lago, la cual por el gran contraste entre las propiedades de los estratos blandos y los estratos firmes sobre los que estos se encuentran, dan origen a gran amplificación de las ondas sísmicas lo que lleva a daños estructurales por los grandes movimientos presentados causando en ocasiones el colapso de las estructuras como es el caso de algunos de los grandes sismos que ha afectado al Valle de México.

## **1.2 Factores que influyen en el movimiento sísmico en el valle de México**

Los factores que participan en el comportamiento del movimiento sísmico del Valle de México desde que la energía sísmica es liberada hasta que son medidos sus efectos en el Valle son:

### **1.2.1 Fuente sísmica**

El Valle de México es afectado por varias fuentes sísmicas (Rosenblueth y otros, 1987) las cuales se clasifican en cuatro grupos:

- La cuenca o sus cercanías: genera temblores locales con magnitudes menores que 5.5.
- Placa de Norteamérica: genera temblores tipo Acambay con magnitudes de hasta 7.0.
- Zona de subducción: es la fuente que más daños ha causado, por haber presentado sismos de magnitud de hasta 8.2. Está ubicada a una distancia entre 280 y 600 km del Valle de México. Genera ondas ricas en periodos largos y grandes duraciones de tiempo de la excitación sobre el suelo blando del Valle.
- Falla normal: es una fuente localizada a profundidad intermedia causada por el rompimiento de la placa de Cocos ya subducida. Puede presentar magnitudes de hasta 8.0 y menores a medida de que la falla ocurre a mayor profundidad.

El mecanismo de liberación de la energía en la fuente sísmica puede ser muy variado en su configuración y de él dependen la magnitud, la duración y el contenido de frecuencias del evento sísmico. No es lo mismo a que este mecanismo concentrara la liberación de

energía en un punto a que la presente en un plano de falla caracterizado por su azimut e inclinación respecto a la vertical. Este comportamiento llamado directividad, puede algunas veces apreciarse en los registros de aceleración en zonas cercanas al epicentro.

### 1.2.2 Trayectoria

El efecto de la trayectoria es la atenuación de las ondas generadas en la fuente sísmica. Estas ondas van perdiendo energía a medida que se desplazan entre los diferentes tipos de material que se presenta entre la fuente y el sitio de interés. Los sitios que se pueden ver afectados por las ondas sísmicas, pueden presentar un comportamiento diferente ante la excitación debido a las características del material presente entre la fuente y los diferentes puntos de registro, lo cual produce una atenuación diferente en cada dirección.

El movimiento horizontal en el Valle es generado por las ondas de cuerpo P y S y las ondas superficiales; las primeras participan de forma importante en el movimiento del terreno, sobre todo las ondas S; posteriormente se genera la fase llamada Lg donde aparecen las ondas de superficie que se mezclan con las ondas S, estos dos tipos de ondas se atenúan con la distancia en proporción a  $R^{-5/6}$ . Para distancias mayores a 100 km tienen participación importante las ondas superficiales, las cuales sufren una atenuación proporcional a  $R^{-1/2}$  (Joyner y Boore, 1983).

### 1.2.3 Efectos regionales

Estos son originados por características geológicas que afectan el comportamiento de la energía sísmica de forma similar para una zona determinada. Se ha podido apreciar que algunas zonas de suelo firme del Valle presentan amplificaciones con respecto a sitios fuera de la cuenca, más cercanos a la zona epicentral. Esto puede ser originado por la presencia de estratos blandos bajo las capas firmes que afloran en el valle. También se ha apreciado diferencia de movimiento entre estaciones de suelo firme dentro del Valle de México que llegan a ser hasta de 5 veces para el sismo del 25 de abril de 1989; esto puede ser debido a que éstas estaciones están ubicadas en zonas desplantadas sobre depósitos de diferente edad geológica (Reinoso, 1996).

### 1.2.4 Efectos locales

Los efectos locales son la variación del comportamiento del terreno debido a características del sitio que lo diferencian de los sitios cercanos donde se presentan movimientos con contenido de frecuencias y duración diferentes. En el Valle de México, se presentan marcados efectos locales debido al variado espesor del estrato blando y a las características no uniformes del terreno para diferentes direcciones, pudiéndose encontrar respuestas bastante distintas incluso en sitios vecinos.

Se ha podido observar el gran peso que sobre el comportamiento sísmico del Valle presentan los efectos locales (Reinoso, 1991); esto se observa claramente al analizar sismos de diferente dirección de incidencia y ver que para estaciones de suelo firme en el

Valle se presenta un comportamiento similar lo cual indica que la gran diferencia presentada de un sitio a otro se debe a los efectos propios en cada sitio.

### 1.3 Sismos en México

En México, los grandes temblores, aquellos con magnitud superior a 7, son originados en la costa del pacifico por la subducción de la placa de Cocos bajo la placa de Norte América. La placa de Cocos se subduce con una velocidad promedio aproximada de 6 cm por año; este fenómeno de subducción lleva al acumulamiento de energía entre la superficie de estas dos placas y cuando los esfuerzos generados en la interfaz superan la resistencia de las partes en contacto, se produce un corrimiento repentino provocando la liberación de energía que origina el evento sísmico.

Grandes temblores también son originados en el continente con profundidades cercanas a 60 km por el fallamiento normal de la placa subducida bajo placa continental. Este tipo de falla, llamada falla normal no es tan frecuente como la de subducción, aunque se debe tener muy en cuenta por la cantidad de energía que puede llegar a liberar.

Otro tipo de sismos son los de origen continental, aunque mucho menos frecuentes que los dos anteriores, se han llegado a registrar magnitudes mayores a 7.

En la figura 1.2 se pueden apreciar las zonas de ruptura de los sismos de las últimas dos décadas.

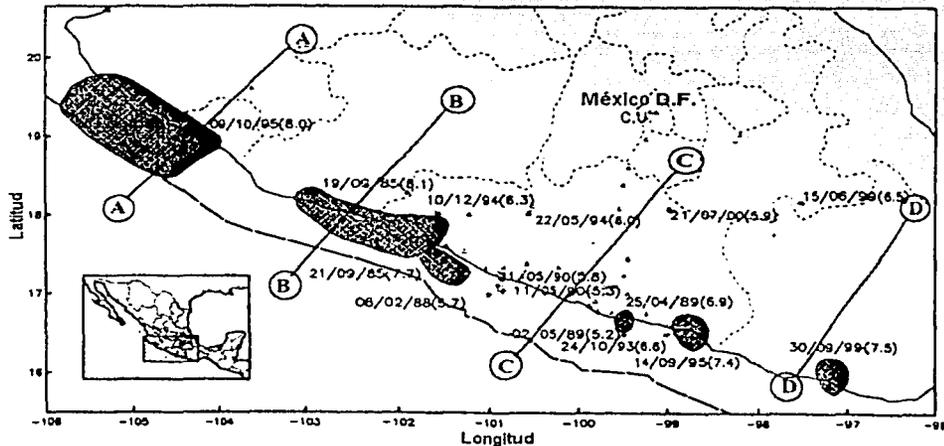


Figura 1.2 Zona de ruptura de los grandes sismos durante los últimos 18 años

Ya que el proceso de liberación de energía sísmica por subducción conlleva una cierta acumulación de la misma, se ha usado el termino de "brecha sísmica" para designar el área de contacto de entre las placas que no ha liberado energía por un lapso de tiempo considerable. En la actualidad en la costa del pacifico Mexicano se han identificado varias brechas sísmicas (eg Kelleher et al, 1973; Singh et al, 1981) donde la más destacada es la de Guerrero, en cuya zona noroeste desde Petatlán hasta Acapulco no ha liberado energía en grandes temblores en los últimos 80 años y en su parte sureste que va desde Acapulco hasta Ometepepec, los últimos eventos de importancia han sido los eventos de 1957 y 1962 (S.K. Singh y M. Ordaz, 1995).

Por ser el mecanismo de liberación de la energía sísmica un fenómeno tan complejo, hasta el momento la herramienta probabilística es la más indicada para tratar de predecir el momento de liberación de energía y la magnitud que puede llegar a tener dicho evento.

#### 1.4 Red Acelerométrica del Valle de México

La instrumentación y registro de los eventos sísmicos que han afectado al Valle de México comienza con la instalación del sismógrafo de Tacubaya en 1910 a cargo del Servicio Sismológico Nacional y hoy día a cargo del Instituto de Geofísica de la UNAM. Después del sismo del Angel (1957), el Instituto de Ingeniería de la UNAM ha instalado una serie de acelerografos en el Valle de México y otros sitios de la Republica. Después del sismo del 19 de septiembre de 1985, la red acelerométrica existente ha venido creciendo gracias a la intervención de organismos del Gobierno de México, Distrito Federal, instituciones de investigación, instituciones publicas y privadas (ver figura 1.3).

Hoy día se cuenta con una completa red acelerométrica que posee aparatos en campo libre, en pozo y en estructuras con el fin de tener una colección completa de datos que relacionen el comportamiento de diferentes puntos permitiendo así el estudio del comportamiento de las ondas a través de las capas de suelo y su interacción con las estructuras, entre otros.

En la tabla 1.1 se listan en forma detallada los distintos tipos de acelerógrafos, así como las instituciones encargadas de su adecuado funcionamiento.

Tabla 1.1 Acelerógrafos instalados en el Valle de México hasta 1995. (J.M. Espinosa, 1995)

Tipo de suelo	Lomas			Transición			Lago			Alto riesgo			Totales		
	Sup.	Pozo	Edif.	Sup.	Pozo	Edif.	Sup.	Pozo	Edif.	Sup.	Pozo	Edif.	Sup.	Pozo	Edif.
Nivel															
CENAPRED	2	2		3	3	2	3	6	3	3	2		11	13	5
CISESE											9		1	2	9
CIRESE	9		6	5			12	5		10	2	11	36	7	17
CIRESE-FICA	3			2			16	2	9	8			29	2	9
I de I	6			1			5		5	5	2	22	17	2	27
I de G		1												1	
UAM				1									3		3
Otros					2	7			2					2	7
Sub total	20	3	6	12	5	9	38	13	17	27	8	42	97	29	74
Totales		29			26			68			77			200	

Gracias a esta completa red acelerométrica hoy día se cuentan con una buena cantidad de estudios del comportamiento sísmico del valle que han permitido elaborar y complementar normas que pretenden un mejor desempeño estructural a partir de un diseño que contemple en forma adecuada los efectos sísmicos que el Valle de México experimenta.

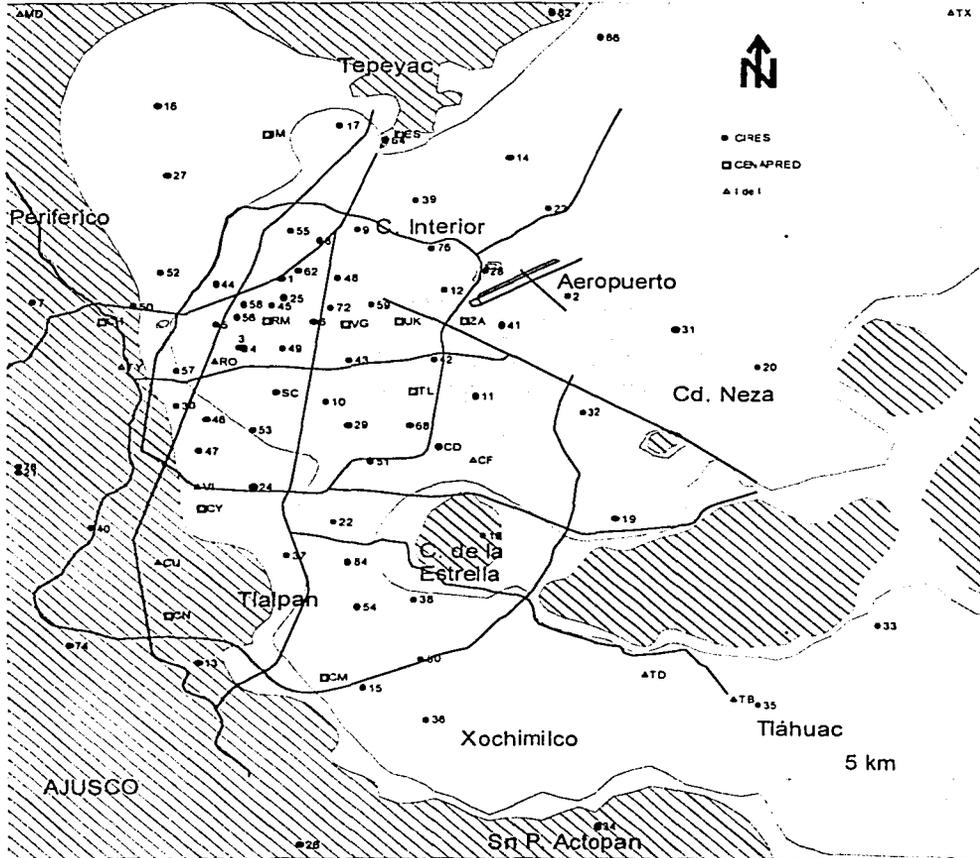


Figura 1.3 Red Acelerométrica del Valle de México

### 1.5 Estado preliminar de los datos

Para procesar la información se parte del hecho que ésta está perfectamente registrada o se conoce la calidad de la misma para con base en ello saber hasta qué nivel de seguridad se cuenta para el resultado de sus análisis. En nuestro caso partimos del hecho de perfectos registros acelerométricos, pero debido a resultados alejados de lo esperado

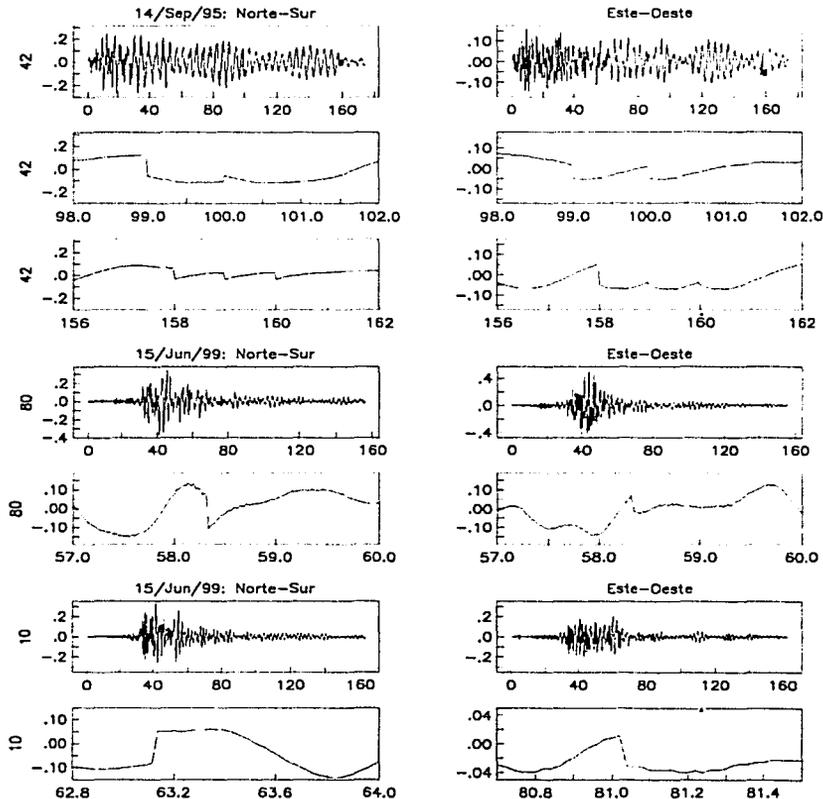


Figura 1.4 Algunos problemas detectados en los registros acelerométricos

para algunos casos se optó por la revisión de los registros, encontrando en ellos problemas como los mostrados en la figura 1.4, donde se aprecia discontinuidad en los datos por falta de calibración de los aparatos.

Estos problemas observados se deben a la calidad de los instrumentos y su utilización en nuestros estudios nos alejaría en algunos casos de la realidad de los fenómenos estudiados; es por ello que se han omitido en el análisis y anexo a una lista de registros defectuosos o con problemas como se observa a continuación en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Calidad en el contenido de los registros en el Valle de México; donde: ? es dato no disponible, c es registro corto, b es registro de baja amplitud y x es registro mal captado.

ESTACIÓN	190395	080238	250489	020689	110590	310590	241093	220594	140595	091099	150699	300999	210700
1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
2	.	.	.	.	c,b	.	.	.	.	.	.	.	.
3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
4	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
5	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
6	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
7	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
8	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
9	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
10	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
11	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
12	.	.	.	c,b	.	.	.	.	.	c,b	.	.	.
13	.	.	.	c,b	.	.	.	.	.	.	.	.	.
14	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
15	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
16	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
17	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
18	.	c,b	.	.	.	c,b	.	.	.	.	.	.	.
19	.	.	.	.	.	c	.	.	.	.	.	.	.
20	.	.	.	c,b	c,b	c	.	.	.	.	.	.	.
21	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
22	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
23	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
24	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
25	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
27	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
28	.	.	.	.	c,n	.	.	.	.	.	.	.	.
29	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
30	.	c	.	.	c	.	.	.	.	.	.	.	.
31	.	c	.	.	c	.	.	.	.	.	.	.	.
32	.	.	.	c,b	c	.	.	c	.	.	.	.	.
33	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
34	.	c	.	c	.	.	.	.	.	.	.	.	.
35	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
36	.	x	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
37	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
38	.	c	.	.	.	.	.	c	.	.	.	.	.
39	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
40	.	.	.	.	.	c	.	.	.	.	.	.	.
41	.	c	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
42	.	.	.	c	c,b	.	.	c,b	.	.	.	.	.
43	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
44	.	c	.	.	.	.	.	c	.	.	.	.	.
45	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
46	.	.	.	.	.	x	.	.	.	.	.	.	.

ESTACIÓN	190945	080328	250408	020508	110590	310590	241093	220594	140895	091095	150699	300999	210700
47	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
48	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
49	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
50	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
51	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
52	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
53	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
54	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
55	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
56	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
57	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
58	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
59	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
62	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
64	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
68	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
72	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
74	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
78	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
80	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
84	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
CD	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
CM	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
MI	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
MP	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
PE	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
RO	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
SC	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
TB	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
TX	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
TY	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
VG	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
VI	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
CU	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
CH	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
CY	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
ES	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
IM	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
RM	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
TL	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
UK	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
ZA	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

TESIS CON  
PASAJE DE ORICEN

## **CAPITULO II**

### **Movimiento sísmico y dirección de la energía en el Valle de México**

Producto de la liberación de energía en una fuente sísmica, se genera una gran cantidad de ondas de muy diferentes amplitudes y frecuencias, las cuales al transmitirse por medio de los distintos estratos de suelo pueden sufrir de aumento o disminución de su amplitud dependiendo de las características de la onda y del suelo a través del cual se está transmitiendo. Todas estas ondas se atenúan en su camino a la superficie donde las que llegan generan un movimiento que en muchos casos puede llegar a ser devastador dependiendo de la energía que estas traigan y obviamente del tipo de estructuras al cual llegan a afectar. El movimiento en la superficie con el cual se ve representada la energía sísmica transmitida por las ondas no es igual en todas las direcciones. Para cualquier tipo de terreno, se presenta una mayor excitación dependiendo del tipo de ondas incidente, de su dirección de incidencia y de las características del terreno. Esta dirección preferencial varía durante un sismo, dependiendo del tipo de ondas que se estén presentando (ondas P, ondas S y ondas superficiales). En el caso particular del Valle de México donde se presenta una capa superficial de suelo blando de muy variado espesor, se tiene un comportamiento con marcadas diferencias en la respuesta sísmica, inclusive para sitios cercanos.

#### **2.1 Movimiento de una partícula del terreno en el plano horizontal**

Analizando el comportamiento de una partícula del terreno ante al paso de las ondas sísmicas, tenemos que esta posee desplazamiento en las tres direcciones, pero teniendo en cuenta que el Valle de México se encuentra a 250 km de la fuente sísmica de nuestro interés, la componente vertical del desplazamiento es lo bastante baja como para ser despreciada. Para analizar solamente el movimiento en el plano horizontal de una partícula del terreno debido al efecto sísmico se emplean los componentes de aceleración NS y EW, los cuales mediante doble integración llegamos a obtener el registro del desplazamiento del suelo.

En las figuras 2.1 y 2.2 se aprecian las historias de desplazamiento del suelo para el sito Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) en los componentes E-W y N-S. Estos registros de desplazamiento nos permiten representar en forma gráfica el movimiento de una partícula de suelo en el plano horizontal al graficar los dos componentes obtenidos en un plano donde se tiene como abscisa el componente E-W y como ordenada el componente N-S de desplazamiento, teniendo así para cada instante de tiempo parejas ordenadas que nos muestran la posición real de la partícula de suelo en cada instante.

En la figura 2.3 se puede apreciar la historia de desplazamiento en el plano horizontal para una partícula del terreno; se presenta este movimiento en ventanas de tiempo con el fin de ilustrar las diferentes etapas del movimiento sísmico y resaltar las que corresponden a la fase intensa.

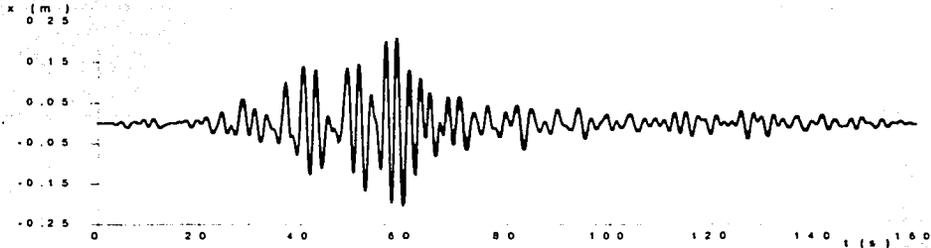


Figura 2.1 Registro de desplazamiento de la estación SC componente E-W para el sismo del 19 de septiembre de 1985

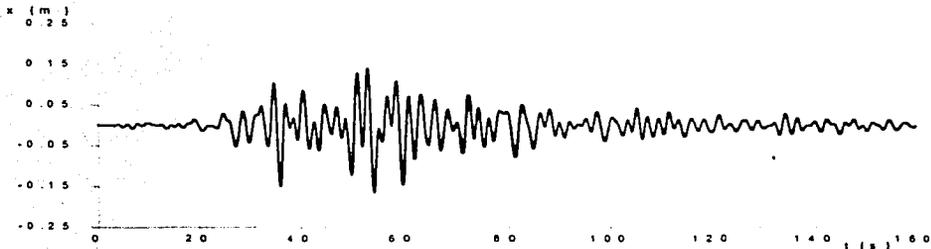


Figura 2.2 Registro de desplazamiento de la estación SC componente N-S para el sismo del 19 de septiembre de 1985

En la figura 2.3 se puede observar para ventanas de tiempo de 20 segundos, cómo durante los primeros 20 s y los últimos 40 s el terreno no experimenta un movimiento significativo, mientras que entre los 20 y 80 s, se presenta la fase importante del movimiento. Se puede también apreciar en esta figura, cómo durante la fase intensa el movimiento es algo caprichoso pero con cierta tendencia a desplazarse en una dirección preferencial como se puede apreciar claramente en la figura 2.3d. En la figura 2.3h se tiene el registro completo de desplazamiento en el plano horizontal.

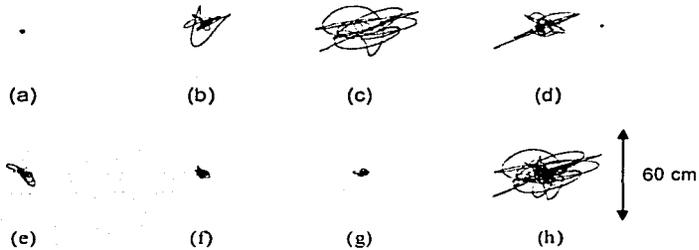


Figura 2.3 Historia de desplazamiento en el tiempo para el sismo del 19/09/85 por ventanas cada 20 s. (a) 0-20, (b) 20-40, (c) 40-60, (d) 60-80, (e) 80-100, (f) 100-120, (g) 120-140, (h) 0-160 registro completo

Se presentan en la figura 2.4 las historias de desplazamiento en el plano horizontal para las estaciones Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SC) (figura 2.4a), Central de Abastos (CD) (figura 2.4b) y Ciudad Universidad (CU) (figura 2.4c) para el sismo del 19 de septiembre de 1985. En la figura 2.4, se compara el comportamiento en el tiempo para una partícula en diferentes sitios del Valle de México, cuyos tamaños se encuentran a igual escala, excepto la figura 2.4d que es la misma figura 2.4c ampliada.

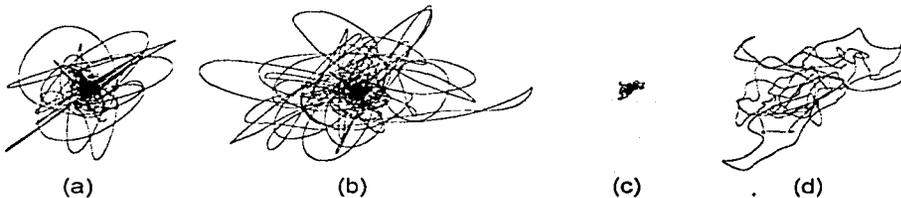


Figura 2.4 Historia de desplazamiento en el tiempo para el sismo del 19/09/85 Estaciones: (a) SC, (b) CD y (c) y (d, ampliada) CU

Se aprecia en la figura 2.4, cómo el comportamiento de la partícula del terreno en la estación Central de Abastos (figura 2.4b) resulta caótico y de mayor amplitud que el observado en la estación SC (figura 2.4a), ambas estaciones localizadas en suelo blando.

Es importante notar cómo efectivamente se aprecia la mayor amplificación del desplazamiento del terreno en sitios de suelo blando respecto a sitios de suelo firme; esto se hace evidente al comparar las figuras 2.4a y 2.4b de las estaciones SC y CD respectivamente con la figura 2.4c de la estación CU. En la figura 2.4d se puede apreciar mejor el comportamiento de la partícula del terreno en la estación CU, la cual aunque presenta una amplificación bastante baja respecto a la presentada en suelo blando, manifiesta una cierta tendencia a desplazarse en la misma dirección que las estaciones de terreno blando SC y CD, aunque por estar esta estación en suelo firme, se esperaría que presentara como ya se ha mencionado anteriormente, un movimiento uniforme debido a las características de este tipo de suelo, pero la tendencia al desplazamiento en la dirección indicada puede ser causada por la presencia de estratos menos blandos bajo este estrato de suelo firme.

Es importante aclarar que aunque en las figuras a la misma escala de desplazamiento del terreno en las estaciones SC y CD (Figuras 2.4a y 2.4b) muestran un mayor desplazamiento en esta última estación, esto no contradice lo observado en 1985 en cuanto a la mayor destrucción presentada en CS ya que para este sitio de periodo 1.9 segundos, para estructuras de periodo cercano a éste, se tiene una historia de desplazamientos como se aprecia en el mapa de desplazamientos horizontales del terreno para varios sitios del Valle de México (figura 2.5a), que deja ver cómo efectivamente CS presentó un mayor desplazamiento que el mostrado en CD y como es aun mayor que el presentado en CD para un periodo estructural igual al periodo del suelo de la estación CD que corresponde a 3.2 segundos (figura 2.5b), donde se esperan los mayores desplazamientos debido al fenómeno de resonancia.

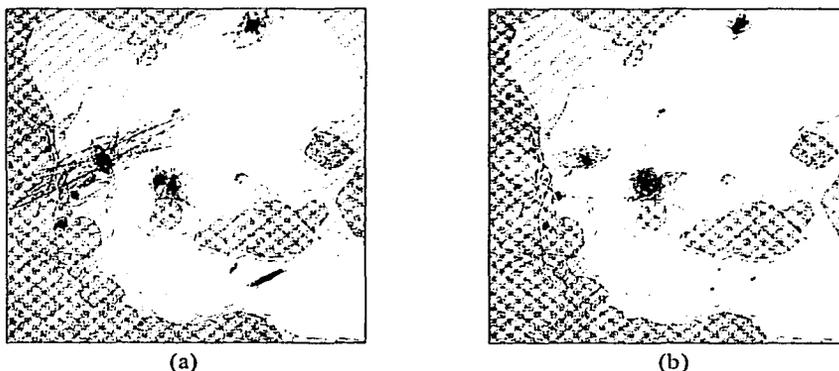


Figura 2.5 Historias de desplazamiento en el tiempo de varios sitios del Valle para el sismo del 19/09/85 y periodos estructurales de (a) 2 s y (b) 3 s y amortiguamiento del 5%

## 2.2 Energías mínima y máxima, rombos de energía para periodos del suelo

De las historias de desplazamiento del suelo mostradas en las figuras 2.3 y 2.4 e incluso de las historias de desplazamiento para varios periodos estructurales mostradas en la figura 2.5 es claro que en suelo blando existe una dirección preferencial del movimiento, o sea una dirección preferencial de la energía sísmica. Con el fin de ilustrar mejor este comportamiento de la energía, se han elaborado mapas con rombos, que nos indican la dirección preferencial y la cantidad de energía en proporción al tamaño de cada rombo (figuras de la 2.6 a la 2.11).

La dirección de estos rombos está calculada con base en la amplitud de los espectros de Fourier de los registros de aceleración correspondiente a los diferentes sismos, donde para cada uno de los periodos indicados, se filtra el acelerograma en el dominio de la frecuencia tomando los valores comprendidos en un intervalo de  $\pm 0.3$  s del periodo especificado. Por lo tanto, si tenemos un cuadrado, esto nos indica que la energía está igualmente amplificada en todas las direcciones o por el contrario si es un rombo bastante agudo indica que hay una dirección donde se concentra mucha energía comparada con la dirección ortogonal que posee poca.

Las figuras 2.6 a 2.11 muestran resultados para 5 sismos: 19 de septiembre de 1985, 25 de abril de 1989, 31 de mayo de 1990, 14 de septiembre de 1995, 9 de octubre de 1995 y 15 de junio de 1999. En cada caso, los mapas para los periodos de 1 a 5 s se presenta la misma escala mientras que para el periodo de 10 s se tiene una escala ampliada con el fin de revisar para cada sismo la correcta orientación de los aparatos.

Para el 19 de septiembre de 1985 (figura 2.6), en general se aprecia un comportamiento caótico de la energía, para  $T \approx 1$  s, se presenta la máxima energía en el sentido transversal al de desplazamiento de las ondas desde su origen, lo cual supone la presencia de ondas transversales como lo son las ondas SH o superficiales de Love.

Para la estación CD (figura 2.6), la cual tiene un periodo característico de 3.2 s, en 4 s presenta una mayor energía que la presentada en 3 s; esto nos podría hacer pensar que en 4 s ésta estación está siendo excitada por ondas generadas en el Cerro de la Estrella.

Se aprecia en general para este sismo (figura 2.6), que las estaciones cercanas al Cerro de la Estrella como los son la estación CF, TD y TB presentan para los periodos estudiados una dirección distinta a la presentada por las demás estaciones, lo que supone la presencia de ondas generadas por el Cerro de la Estrella.

Para periodos cercanos a 1s (figura 2.6), se aprecia un comportamiento totalmente caótico lo que deja ver para esos periodos el dominio de los variados efectos de sitio presentados en el suelo blando del Valle. Para periodos un poco mayores ( $T \approx 2$  s) se ve que la máxima energía se presenta paralela a la línea de cambio de terreno de transición a zona de lago, lo que nos podría indicar el dominio de ondas generadas por esta discontinuidad, pudiendo pensar que la energía por ellas transmitida se desplaza en sentido transversal a la fuente que las genera (discontinuidad).

Para periodos altos (figura 2.6), se tiene una concordancia en la dirección preferencial de la energía, mostrándonos que esta se presenta en el mismo sentido de propagación de las ondas desde su origen.

Respecto al sismo del 31 de mayo de 1990 (figura 2.8), debido a la baja amplitud de su movimiento, se puede apreciar para el periodo de 5 segundos, la correcta orientación de los aparatos.

Se aprecia también en este sismo (figura 2.8), un caos en el comportamiento de la energía para periodos bajos ( $T \approx 1$  s) lo que nos muestra el dominio de los efectos de sitio. Ya para periodos un poco mayores, se ve al igual que para el caso del 25 de abril de 1989, la posible presencia de ondas originadas en la zona de cambio entre zona de transición y zona blanda, esto debido a la mayor amplificación mostrada por los rombos en sentido transversal a ésta línea de separación de las dos zonas.

Para periodos grandes ( $T \approx 5$  s) se puede apreciar (figura 2.8), la uniforme alineación de la energía y un marcado efecto de dirección preferencial para resonancia presentado en las estaciones 11, 20, 31 y 41 que poseen un periodo característico cercano a 5 s.

Las ondas que suponemos originadas por el Cerro de la Estrella para un periodo de 4 s, al parecer por lo bajo de este sismo no alcanzan a ser generadas (figura 2.8).

Para el sismo del 14 de septiembre de 1995 (figura 2.9), se observan características similares a las ya vistas en los anteriores sismos analizados. En este caso tampoco se aprecia la energía captada alrededor de 4 s.

El sismo del 9 de octubre de 1995 (figura 2.10), para periodos alrededor de 1 s presenta las mismas características apreciadas en los sismos anteriores alrededor de ese periodo. Para periodos un poco mayores se tiene un comportamiento de la energía algo uniforme.

Se aprecia que para periodos bajos (figura 2.9), se presenta un comportamiento muy variable como en los casos anteriores. Para periodos alrededor de los 3 segundos comienza a notarse una concordancia en la dirección preferencial de la energía.

De la observación de los anteriores mapas de rombos (figuras de la 2.6 a la 2.11) se puede ver que para varias estaciones se presenta generalmente alrededor de su periodo característico una determinada dirección preferencial de la energía sísmica, lo cual nos corrobora que en el suelo blando del Valle de México no cuenta con igual comportamiento en las diferentes direcciones.

Del comportamiento visto por estaciones cercanas al Cerro de la Estrella para los distintos sismos analizados mediante los rombos de energía, se puede pensar que éste cerro influye en la dirección preferencial de la misma para cada una de éstas estaciones.

Se pudo observar que la línea de discontinuidad que marca el cambio de suelo blando a suelo de transición, es una fuente de ondas que afectan para periodos de alrededor de 2 s la dirección preferencial de la energía.

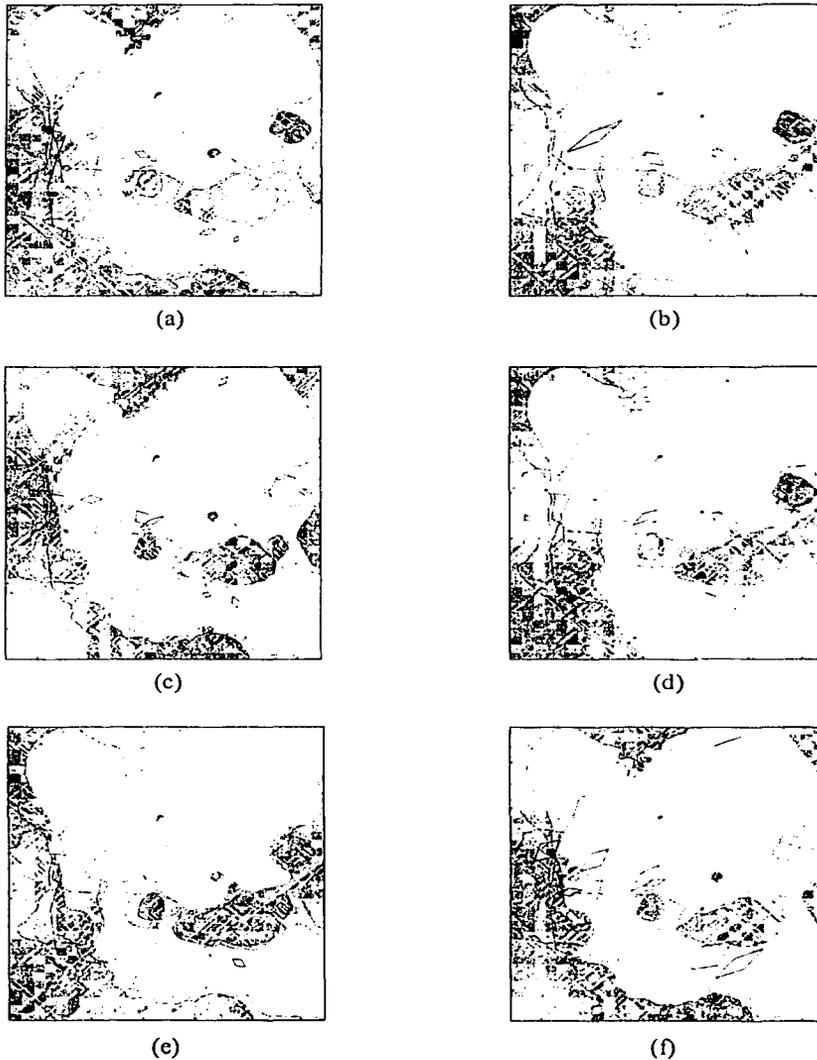


Figura 2.6 Mapas de dirección del movimiento sísmico para varios periodos durante el sismo del 19 de septiembre de 1985: (a)  $T=1.0$  s (b)  $T=2.0$  s (c)  $T=3.0$  s (d)  $T=4.0$  s (e)  $T=5.0$  s (f)  $T=10.0$  s

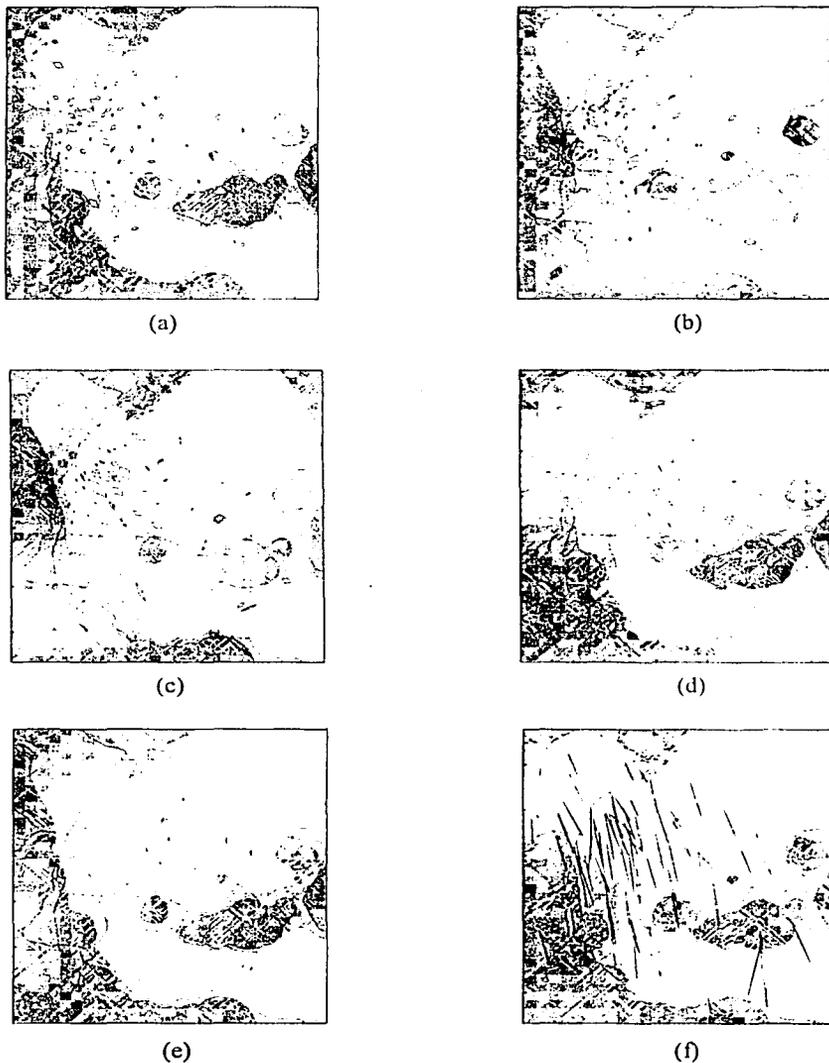


Figura 2.7 Mapas de dirección del movimiento sísmico para varios periodos durante el sismo del 25 de abril de 1989: (a) T=1.0 s (b) T=2.0 s (c) T=3.0 s (d) T=4.0 s (e) T=5.0 s (f) T=10.0 s



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 2.8 Mapas de dirección del movimiento sísmico para varios periodos durante el sismo del 31 de mayo de 1990: (a) T=1.0 s (b) T=2.0 s (c) T=3.0 s (d) T=4.0 s (e) T=5.0 s (f) T=5.0 s ampliado

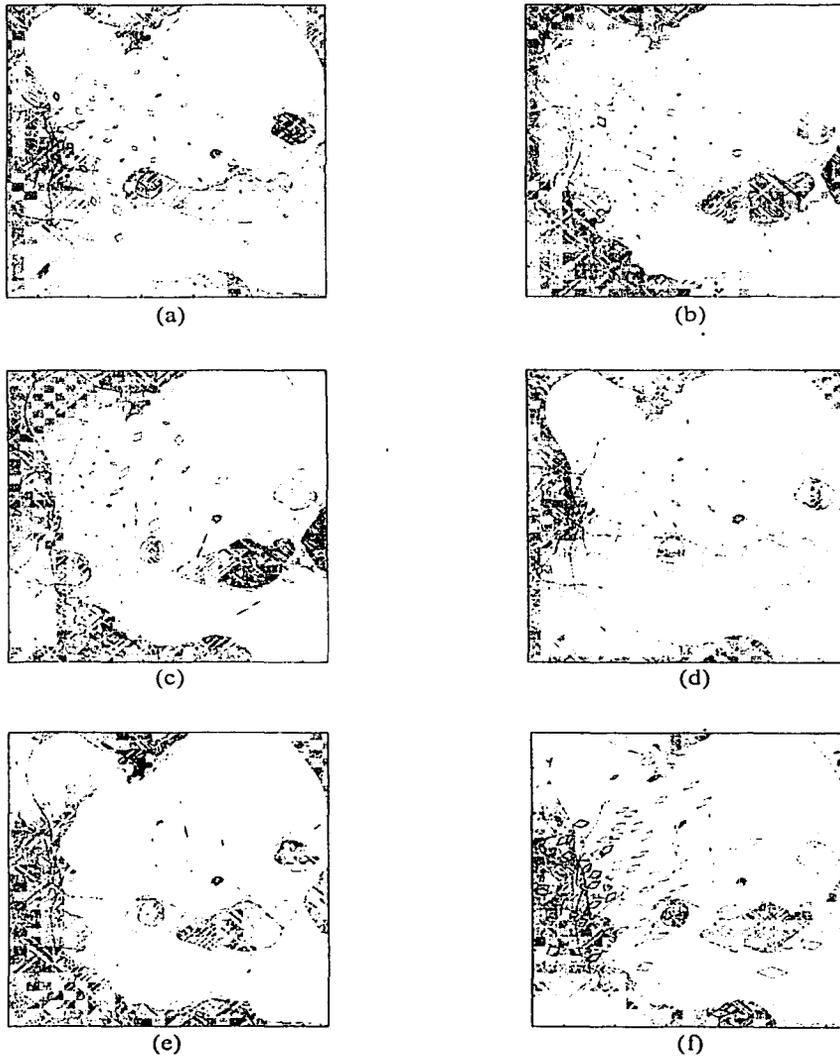


Figura 2.9 Mapas de dirección del movimiento sísmico para varios periodos durante el sismo del 14 de septiembre de 1995: (a) T=1.0 s (b) T=2.0 s (c) T=3.0 s (d) T=4.0 s (e) T=5.0 s (f) T=10.0 s

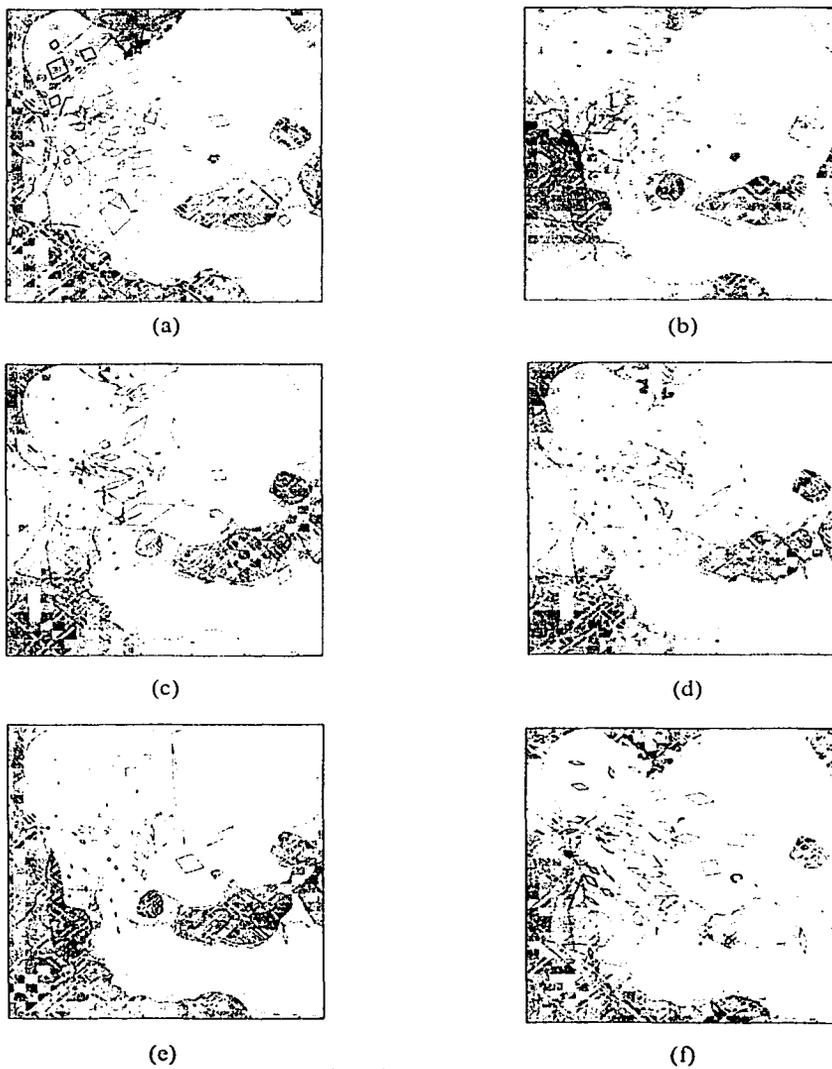


Figura 2.10 Mapas de dirección del movimiento sísmico para varios periodos durante el sismo del 9 de octubre de 1995: (a) T=1.0 s (b) T=2.0 s (c) T=3.0 s (d) T=4.0 s (e) T=5.0 s (f) T=10.0 s

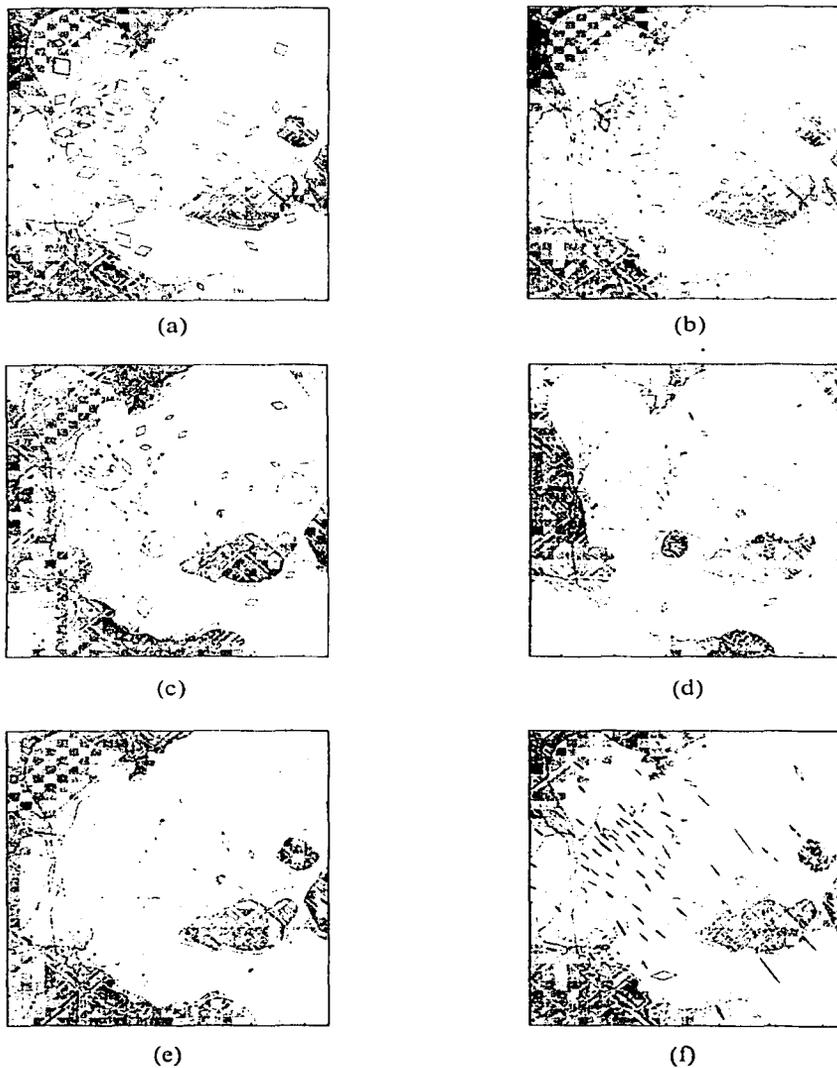


Figura 2.11 Mapas de dirección del movimiento sísmico para varios periodos durante el sismo del 15 de junio de 1999: (a) T=1.0 s (b) T=2.0 s (c) T=3.0 s (d) T=4.0 s (e) T=5.0 s (f) T=10.0 s

### CAPITULO III

## Movimiento del suelo dentro del plano horizontal en el Valle de México para sismos representativos

El sismo del 19 de septiembre de 1985 impulsó enormemente el estudio del comportamiento sísmico del Valle de México. Se han incrementado los esfuerzos por comprender la forma en que se transmite la energía sísmica desde la fuente hasta el Valle y su efecto en el suelo blando sobre el cual se encuentran desplantadas estructuras de muy variada importancia y comportamiento estructural. El movimiento en el Valle de México debido a sismos está compuesto por la superposición de varios efectos como lo son el mecanismo de liberación de energía que da origen al sismo, las características geológicas y topográficas del camino que las ondas siguen para llegar al Valle, las características geológicas y topográficas de la cuenca del Valle de México y los efectos locales debido a las especiales características del suelo blando del Valle.

Con el fin de evaluar el comportamiento del movimiento en el plano horizontal del Valle se escogieron para este fin tres sismos con diferente dirección de incidencia (figura 3.1) y tipo de falla. En la Tabla 3.1 se listan estos sismos.

Tabla 3.1 Características de los sismos estudiados en este capítulo.

Sismo	Tipo de falla	Magnitud	Profundidad [km]	Dirección de incidencia
15/06/99	Normal	6.5	69	N59E
19/09/85	Subducción	8.1	15	N07W
14/09/95	Subducción	7.4	45	N53W

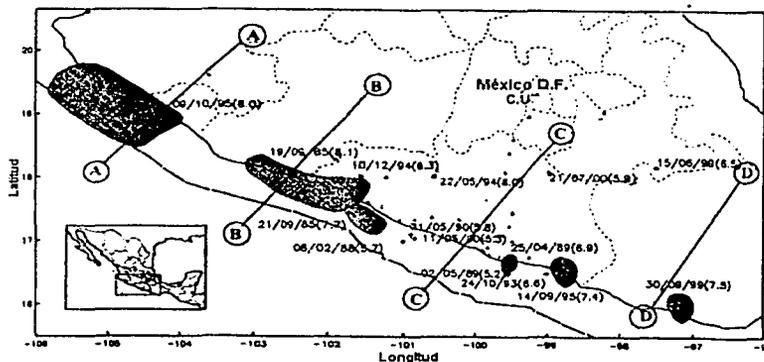


Figura 3.1 Zonas de ruptura y epicentro de los grandes sismos ocurridos durante los últimos 16 años

En lo que sigue se analiza para estos sismos el comportamiento del suelo para estaciones fuera del Valle y en suelo firme y suelo blando dentro del Valle de México; esto tratando de identificar parámetros de comportamiento de la energía sísmica frente a los diferentes factores que la afectan en su camino al Valle.

### 3.1 Sismo del 15 de junio de 1999

Para el sismo del 15 de junio de 1999 ( $M_w=7.0$ ) (Singh et al, 1999) para algunas estaciones cercanas al epicentro ubicado en Tehuacán (figura 3.2), se puede apreciar la diferencia en la duración de los registros de aceleración; para el componente N-S (figura 3.3), es notoria la corta duración de la fase intensa en las estaciones RABO, YAIG y PLIG comparada con las estaciones PNIG, OXIG y LVIG cuya duración de la fase intensa es mayor; esto sugiere una directividad de la fuente hacia el noroeste a lo largo de la falla.



Figura 3.2 Localización del mecanismo focal para el sismo del 15 de junio de 1999 y algunas estaciones cercanas

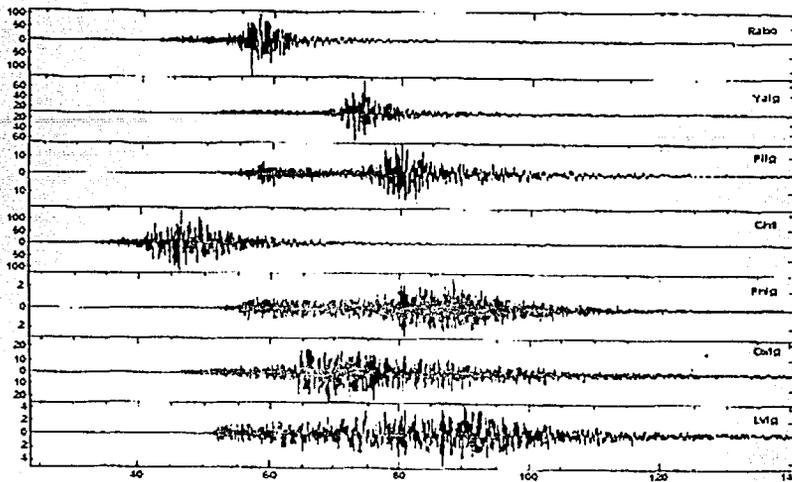


Figura 3.3 Registros de aceleración en el componente N-S del sismo del 15 de junio de 1999 para algunas estaciones cercanas al epicentro

Al apreciar los dos componentes de aceleración en cada una de las anteriores estaciones (figura 3.4), podemos ver cómo el registro es similar en las dos direcciones, lo cual sugiere un comportamiento homogéneo en el plano horizontal en cada uno de estos sitios. Este comportamiento lo podemos apreciar en detalle en los espectros de aceleración de cada una de estas estaciones para distintas direcciones dentro del plano horizontal, las cuales son calculadas cada 15 grados mediante la proyección de las coordenadas N-S y E-W sobre unos nuevos ejes que presentan el ángulo de rotación deseado (figura 3.5). Estos espectros rotados se presentan sobre la misma figura para cada estación y se diferencian mediante la textura empleada para cada uno de ellos como se ilustra en cada gráfico.

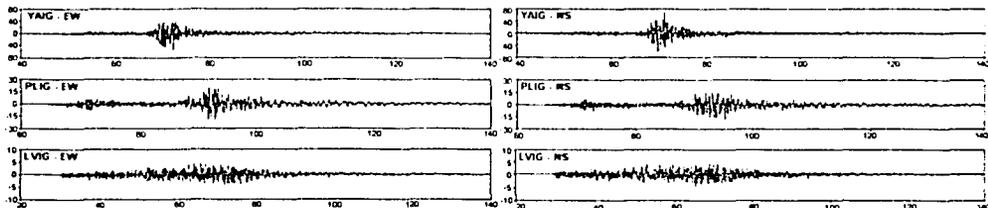


Figura 3.4 Componentes de aceleración del sismo del 15 de junio de 1999 para algunas estaciones cercanas al epicentro

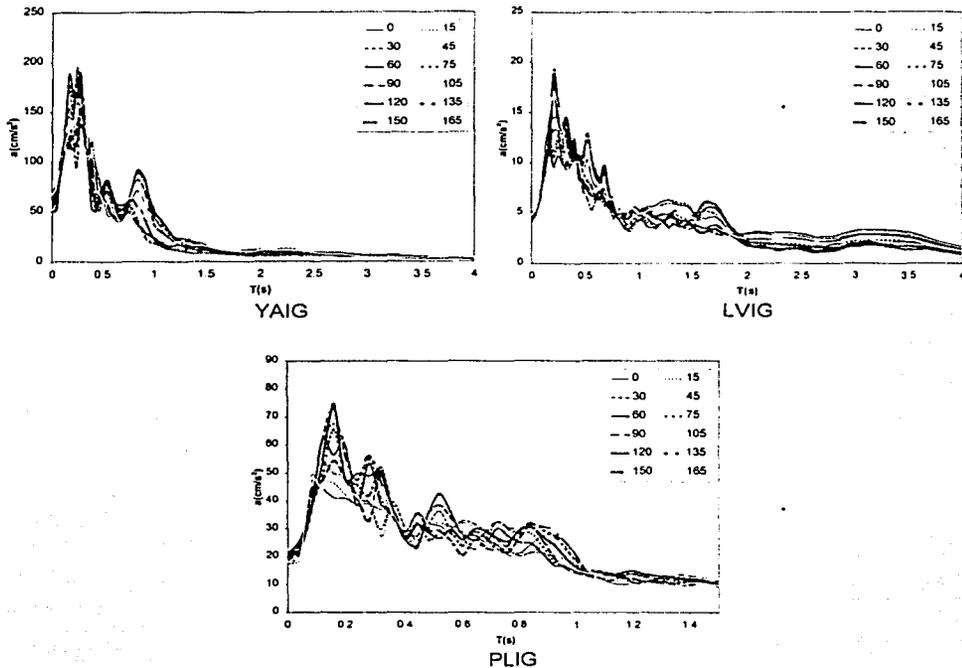


Figura 3.5 Espectros de aceleración rotados para el sismo del 15 de junio de 1999 para algunas estaciones cercanas al epicentro

En estos espectros (fig. 3.5) se aprecia que las diferentes direcciones analizadas dentro del plano horizontal para cada estación presentan comportamiento de la energía un poco diferente, pero para el bajo nivel de aceleraciones presentado puede considerarse que la energía sísmica para distintos periodos en el plano horizontal es independiente de la dirección de análisis. Para resaltar la diferencia del comportamiento de la energía en el plano horizontal, es importante mencionar que en la zona de lago del Valle de México se presentan diferencias bastante grandes entre ordenadas espectrales para diferentes direcciones de análisis, como por ejemplo la diferencia de  $750 \text{ cm/s}^2$  observada en la estación SC para un periodo de 2 s para el sismo el 19 de septiembre de 1985.

En la figura 3.6 tenemos las historias de desplazamiento del suelo (odogramas) de las estaciones YAIG, LVIG y PLIG donde se puede apreciar también en forma clara que el comportamiento del suelo tiende a ser uniforme para todas las direcciones dentro del plano horizontal.

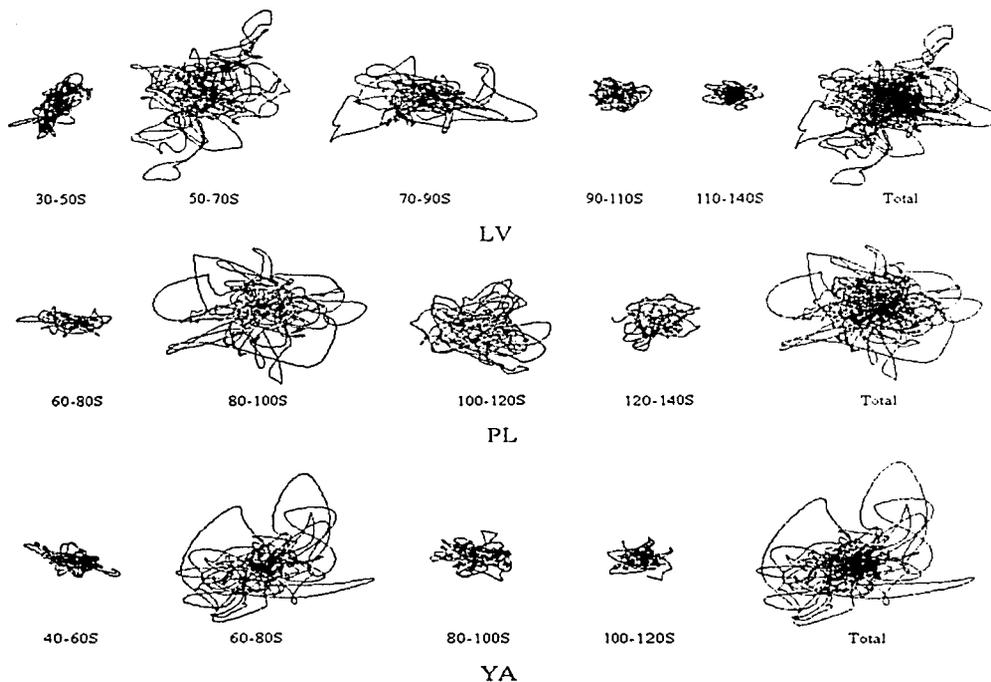


Figura 3.6 Historia de desplazamiento por ventanas en el tiempo de algunas estaciones cercanas al epicentro para el sismo del 15 de junio de 1999

Analizando en detalle las historias de desplazamiento por ventanas de tiempo de las estaciones YAIG (YA), PLIG (PL) y LVIG (LV) (figura 3.6), podemos apreciar cómo en las ventanas correspondientes a cada una de estas estaciones, se presenta el arribo de las ondas P (LV 30-50s, PL 60-80s y YA 40-60s). Se aprecia efectivamente una dirección preferencial del movimiento que en cada caso concuerda con el efecto de directividad antes mencionado. En las ventanas en que dominan las ondas S (LV 50-90s, PL 80-120s y YA 60-80s) se presenta un cambio en la respuesta del suelo debido a estas ondas de excitación transversal, mostrándose marcado este efecto en la estación LVIG. Por último para las ventanas de tiempo donde dominan las ondas superficiales (LV 90-140s, PL 120-140s y YA 80-120s) se ve para la estación YAIG el efecto de la directividad de la fuente, mientras que para las otras dos estaciones no se aprecia preferencia del movimiento.

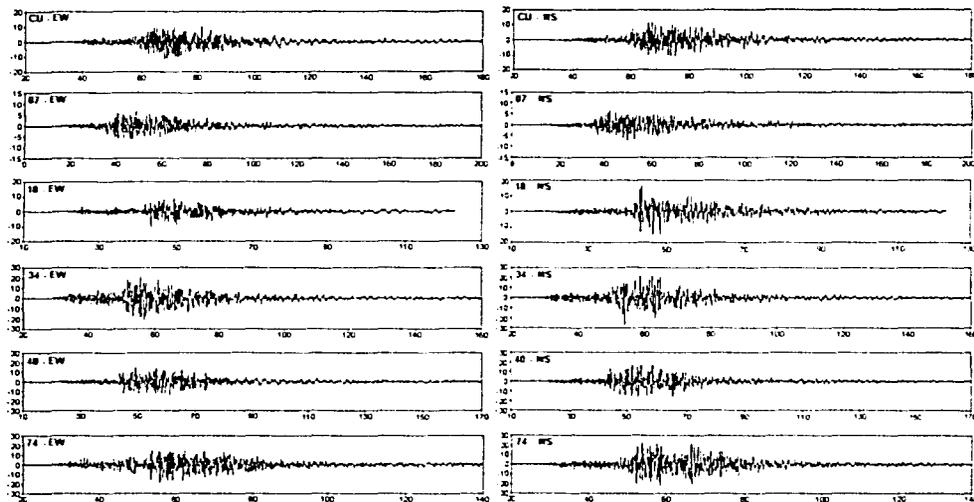


Figura 3.7 Historia de aceleración en el tiempo para el sismo del 15 de junio de 1999 para algunas estaciones de suelo firme dentro del Valle de México

Si analizamos ahora lo ocurrido en el Valle de México para estaciones ubicadas en suelo firme durante este sismo (figura 3.7), podemos apreciar un comportamiento muy parecido entre las componentes de aceleración, lo cual puede hacernos pensar que el suelo presenta igual respuesta en las diferentes direcciones dentro del plano horizontal.

Al analizar con más detalle estos registros de suelo firme, los espectros de pseudoaceleración para las diferentes direcciones rotadas (figura 3.8) muestran la variación de la respuesta del suelo a medida que cambia la dirección dentro del plano horizontal ya que para los diferentes periodos analizados en cada dirección rotada se presentan diferencias en las ordenadas espectrales.

En los espectros de aceleración de las estaciones de suelo firme dentro del Valle de México (figura 3.8) se aprecia que presentan amplificaciones grandes, comparadas con estaciones en suelo firme fuera del Valle más cercanas a la fuente como las estaciones YAIG y PLIG, y esperaríamos que dentro del Valle para suelo firme se presentara una amplificación cercana a la registrada en la estación LVIG la cual está a una distancia epicentral aproximadamente igual a la que se encuentra el Valle de México. La estación LVIG presentó una amplificación mucho menor que la registrada en las estaciones en terreno firme dentro del Valle, lo que muestra el posible efecto de la amplificación dado por los efectos regionales en el Valle de México.

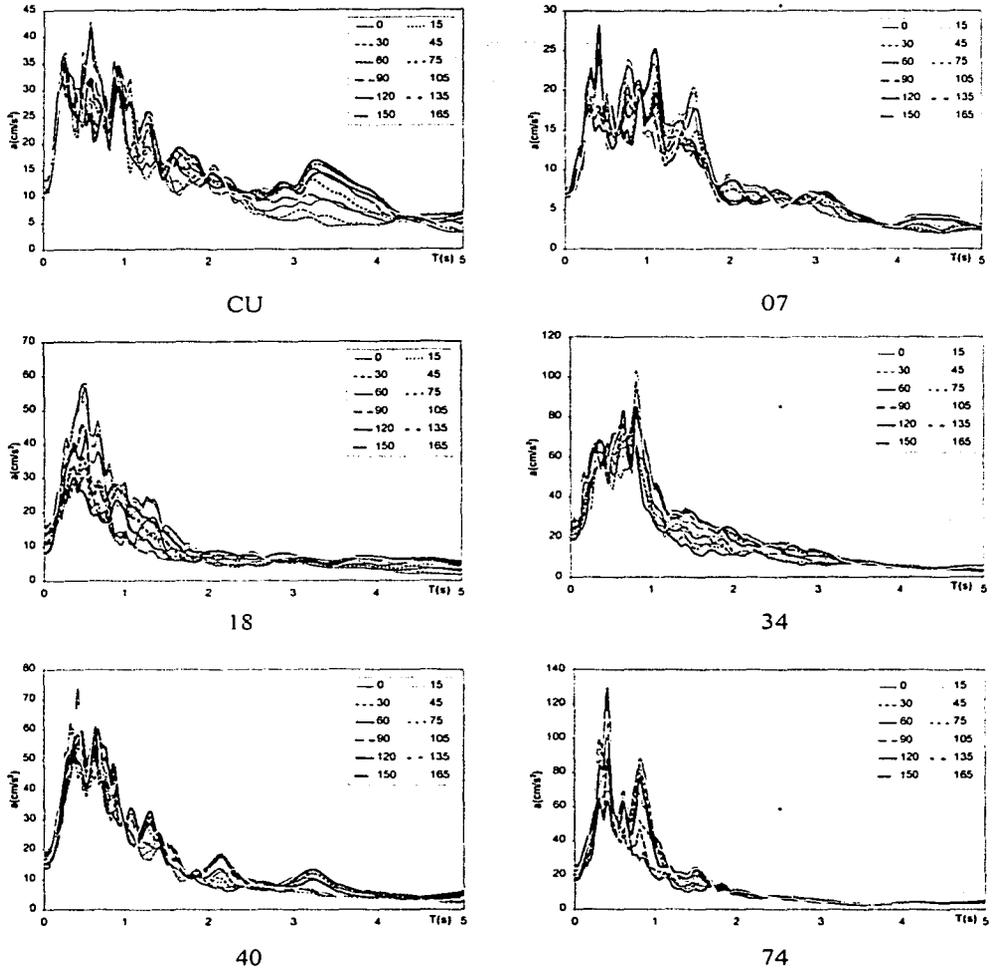


Figura 3.8 Espectros de aceleración de algunas estaciones de terreno firme del Valle de México para el sismo del 15 de junio de 1999

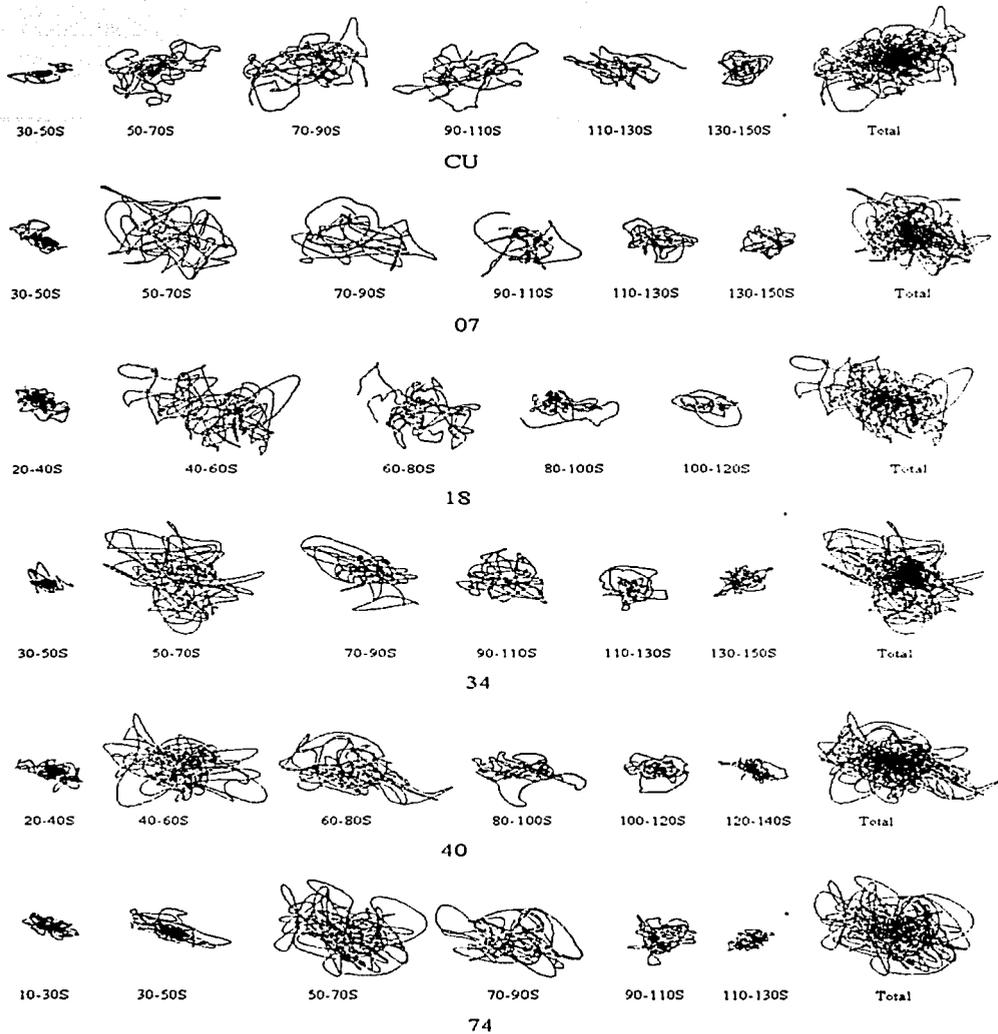


Figura 3.9 Historia de desplazamiento por ventanas en el tiempo de algunas estaciones de suelo firme del Valle de México para el sismo del 15 de junio de 1999

En las historias de desplazamiento en el tiempo para las estaciones de terreno firme dentro del Valle de México (figura 3.9), se puede apreciar que en la ventana de tiempo correspondiente al arribo de las ondas P para todos los casos se tiene una notable tendencia del desplazamiento en el sentido de arribo de las ondas, lo cual es de esperarse, ya que este tipo de ondas excita al medio en el mismo sentido de su propagación. Para las ventanas de tiempo donde se presentan las ondas S, se aprecia en comparación con cercanías de la fuente, preferencia del movimiento a la dirección de incidencia en contraste a lo presentado fuera del Valle.

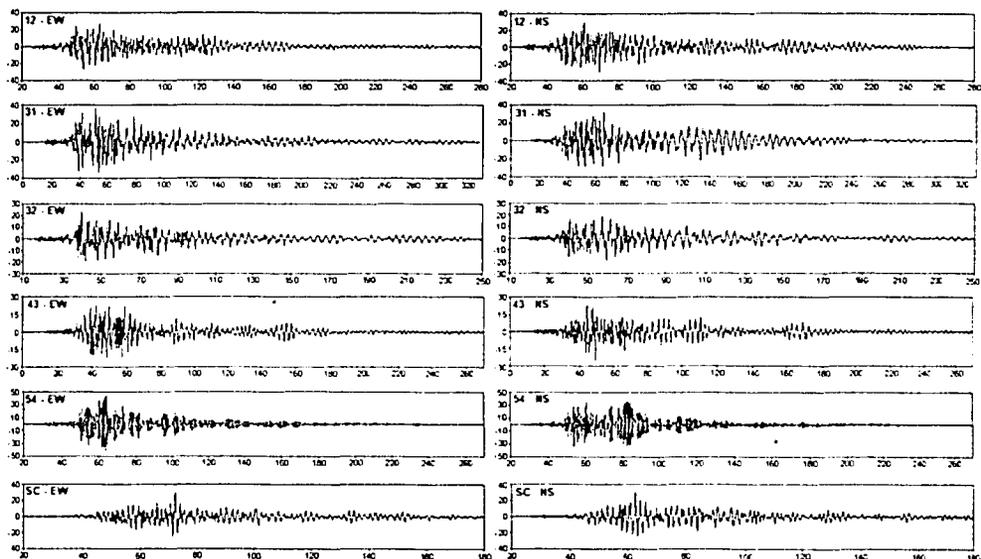


Figura 3.10 Historia de aceleración en el tiempo para el sismo del 15 de junio de 1999 para algunas estaciones de suelo blando dentro del Valle de México

Al analizar con detalle las diferentes direcciones dentro del plano horizontal mediante espectros de aceleración (figura 3.11), se puede ver que la respuesta del suelo cambia, presentando una dirección preferencial en el periodo del sitio, que para las estaciones analizadas tiende a ser la dirección de incidencia de las ondas sísmicas. Esto ocurre en general para las estaciones 12, 31 y 32 (Tabla 3.2). Para las estaciones 54 y SC se presenta un comportamiento más uniforme para las diferentes direcciones estudiadas.

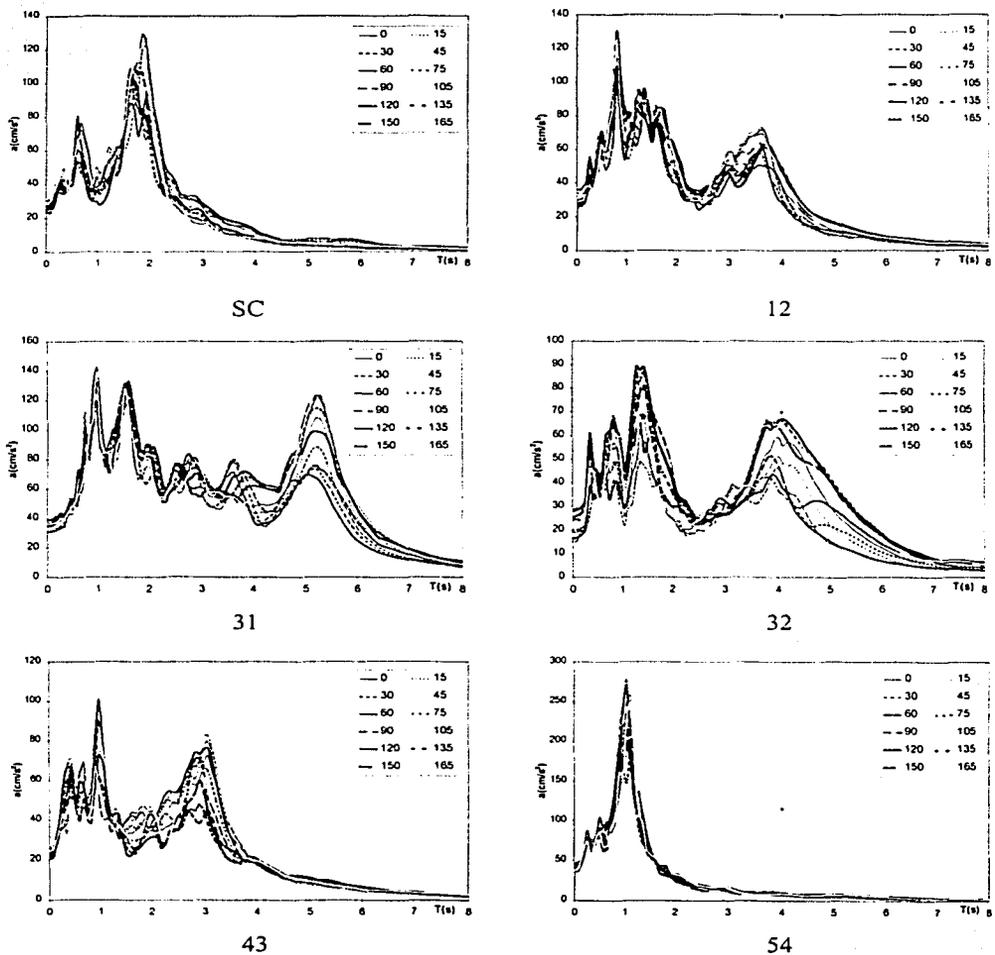


Figura 3.11 Espectros de aceleración de algunas estaciones de terreno blando del Valle de México para el sismo del 15 de junio de 1999

Al analizar con detalle los espectros de respuesta de las estaciones dentro del Valle (Figuras 3.8 y 3.11) se puede apreciar la existencia de ondas con periodo alrededor de 3 s las cuales no presentan un comportamiento uniforme en todas las direcciones analizadas dentro del plano horizontal. Esta energía alrededor de los 3 s es más notoria en las estaciones CU, 07 y 40 y para los tres casos presenta una dirección preferencial de N120E. En suelo blando es también notoria la presencia de energía alrededor de un periodo de 3 s con comportamiento diferente para las direcciones analizadas, en este caso la dirección preferencial para las estaciones 12, 31, 32 y 43 es de N015E, en la estación SC es de N075E mientras que en la estación 54 se tiene un comportamiento uniforme en el plano horizontal para T=3s.

Tabla 3.2 Dirección preferencial para algunas estaciones de suelo blando del Valle de México para el sismo del 15 de junio de 1999

Estación	Periodo de la estación (s)	Periodo (s)					
		1.1	1.9	3.1	3.8	4.4	5.2
12	3.8	165	165	15	150	150	150
31	5.2	150	150	165	120	135	165
32	4.4	105	75	15	135	150	150
43	3.1	60	165	15	135	*	*
54	1.1	75	*	*	*	*	*
SC	1.9	165	180	*	*	*	*

\* significa que en los espectros se presenta igual respuesta dentro del plano horizontal

Las estaciones estudiadas se escogieron con periodo de sitio diferente con el fin de apreciar con más detalle para las diferentes direcciones analizadas, la amplificación del suelo en cada una de ellas correspondiente a su periodo dominante. En la tabla 3.2, se presentan las estaciones estudiadas, su periodo de sitio y las direcciones preferenciales para los diferentes periodos estudiados en cada estación. Estas direcciones son medidas en grados respecto a los ejes N-S y E-W.

En las ventanas de tiempo del movimiento sobre el plano horizontal (odogramas) presentado para las diferentes estaciones de suelo blando estudiadas (figura 3.12), se puede apreciar cómo durante el periodo de tiempo de dominio de las ondas P, se presenta una dirección preferencial del movimiento igual a la dirección de incidencia de las ondas sísmicas. También se puede apreciar en esta figura, el incremento en respuesta transversal a la dirección de incidencia debido a la entrada de las ondas S y el movimiento mas o menos uniforme presentado en la estación 54 para la etapa de dominio de ondas superficiales, el cual puede ser causado por diferentes frentes de onda superficial originados en las cercanas discontinuidades del suelo blando; en la estación SC se aprecia la tendencia para periodos de aproximadamente dos segundos de movimiento paralelo a la discontinuidad del terreno blando observado en estudios anteriores (Reinoso y Quiroga, 2001).

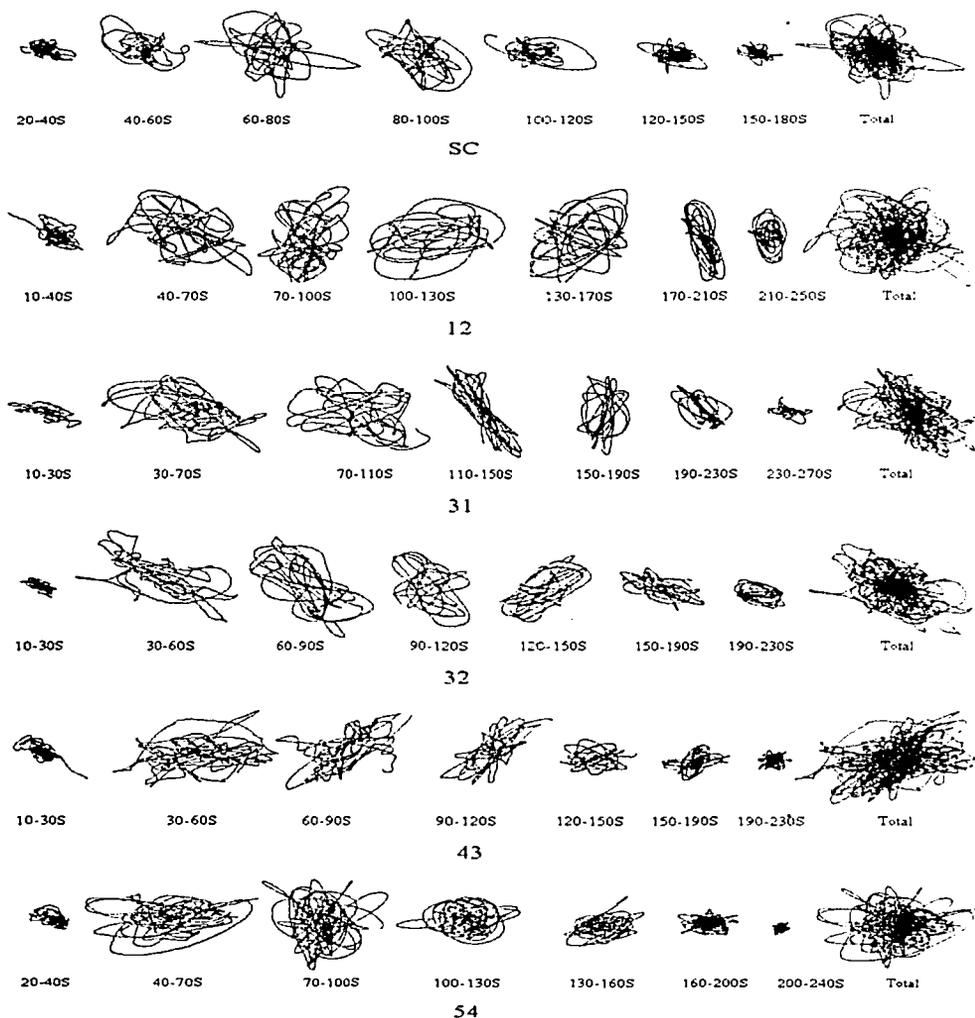


Figura 3.12 Historia de desplazamiento por ventanas en el tiempo de algunas estaciones de suelo blando del Valle de México para el sismo del 15 de junio de 1999

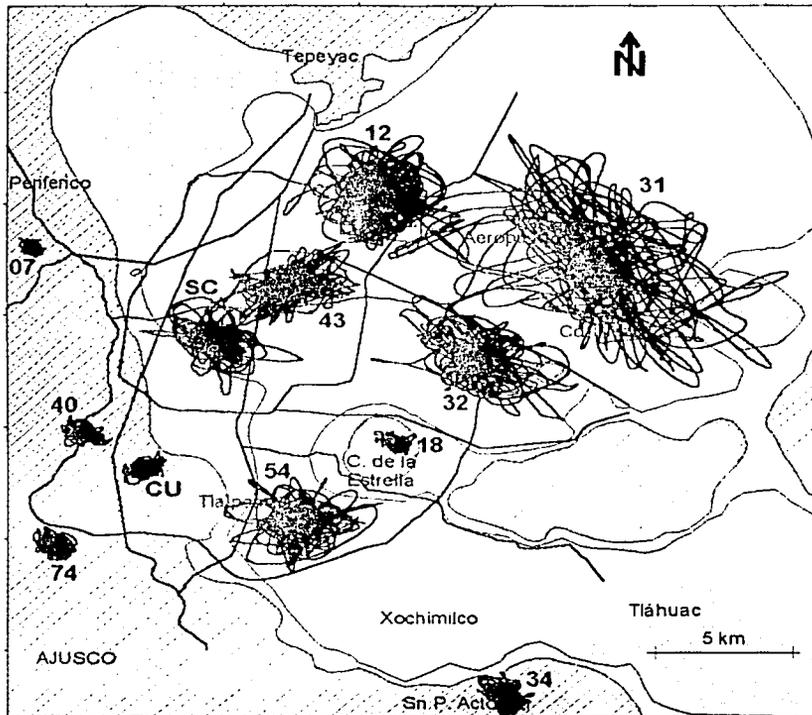


Figura 3.13 Historia de desplazamiento en el tiempo (odogramas), de algunas estaciones del Valle de México para el sismo del 15 de junio de 1999

### 3.2 Sismo del 19 de septiembre de 1985

Si analizamos ahora lo sucedido para el sismo del 19 de septiembre de 1985, de los acelerogramas en los componentes E-W y N-S (figura 3.14), podemos apreciar que al igual que en los registros del 15 de junio de 1999, existe un comportamiento similar para las historias de aceleración, ya que su duración para las estaciones que se encuentran ubicadas a lo largo de la zona de falla es menor que los registros de las estaciones que se encuentran a un lado de ella, esto se nota en la mayor duración de la fase intensa del registro de la estación AP en comparación con la duración de dicha fase en las estaciones CA, OC, UN, VI y ZA, lo cual sugeriría al igual que para el sismo del 15/06/99 una directividad a lo largo del plano de falla.

A pesar de la gran similitud de los componentes ortogonales de aceleración para estas estaciones (figura 3.14), para cada una de ellas al estudiar su comportamiento en varias direcciones dentro del plano horizontal, se aprecia que existen diferencias. Esto se puede apreciar más detalladamente con los análisis de los espectros de aceleración (figura 3.15).

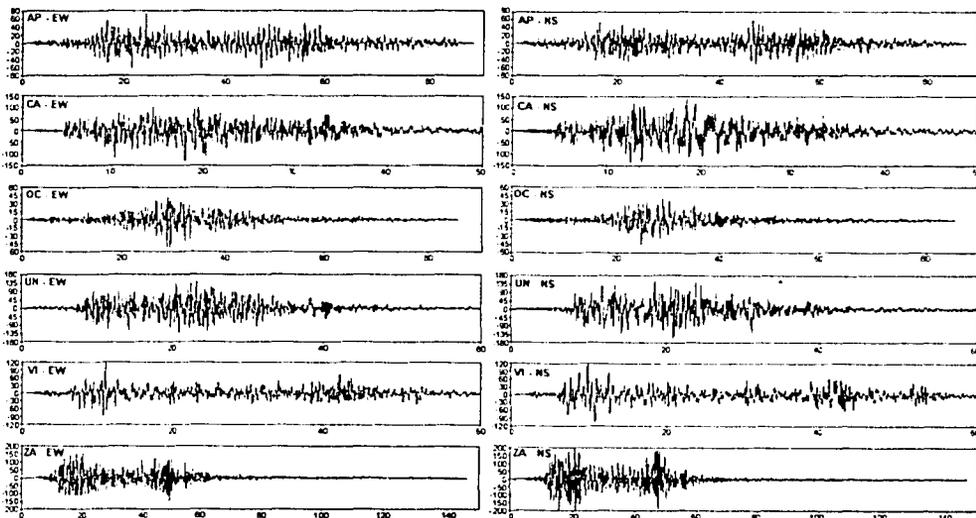


Figura 3.14 Historia de aceleración en el tiempo para el sismo del 19 de septiembre de 1985 para algunas estaciones cercanas al epicentro

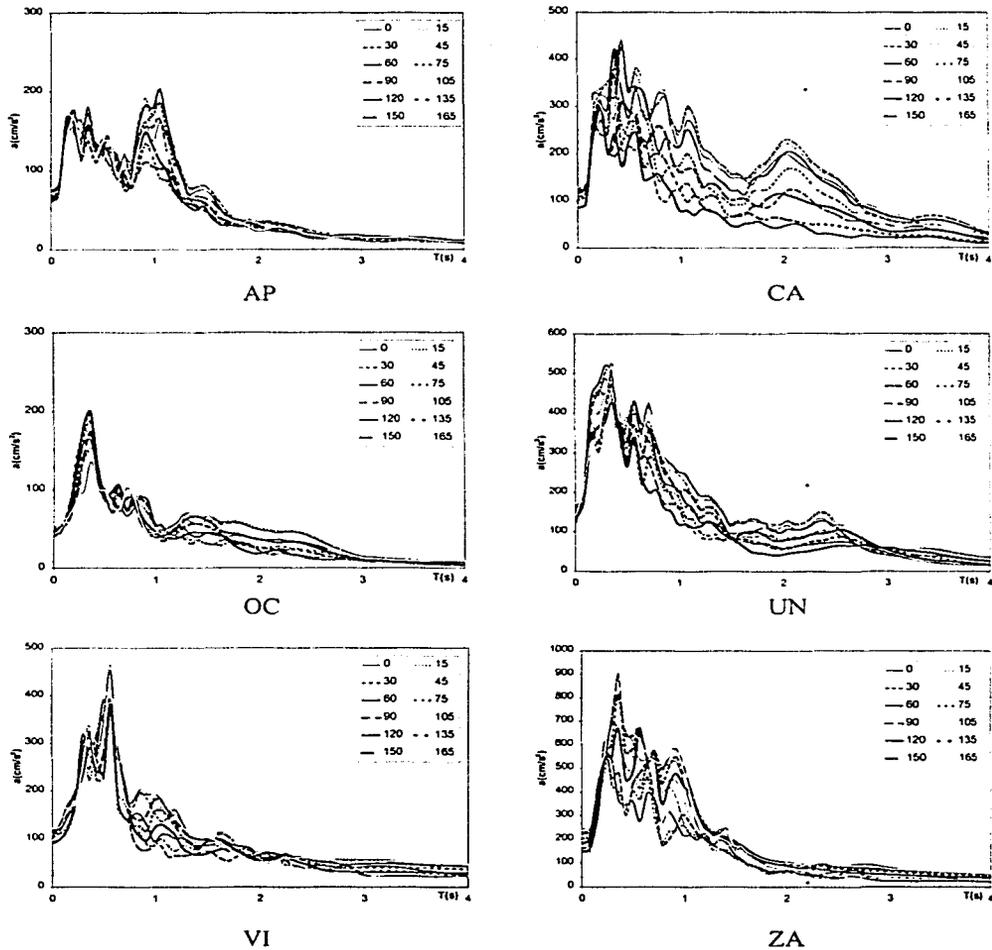


Figura 3.15 Espectros de aceleración de algunas estaciones cercanas al epicentro para el sismo del 19 de septiembre de 1985

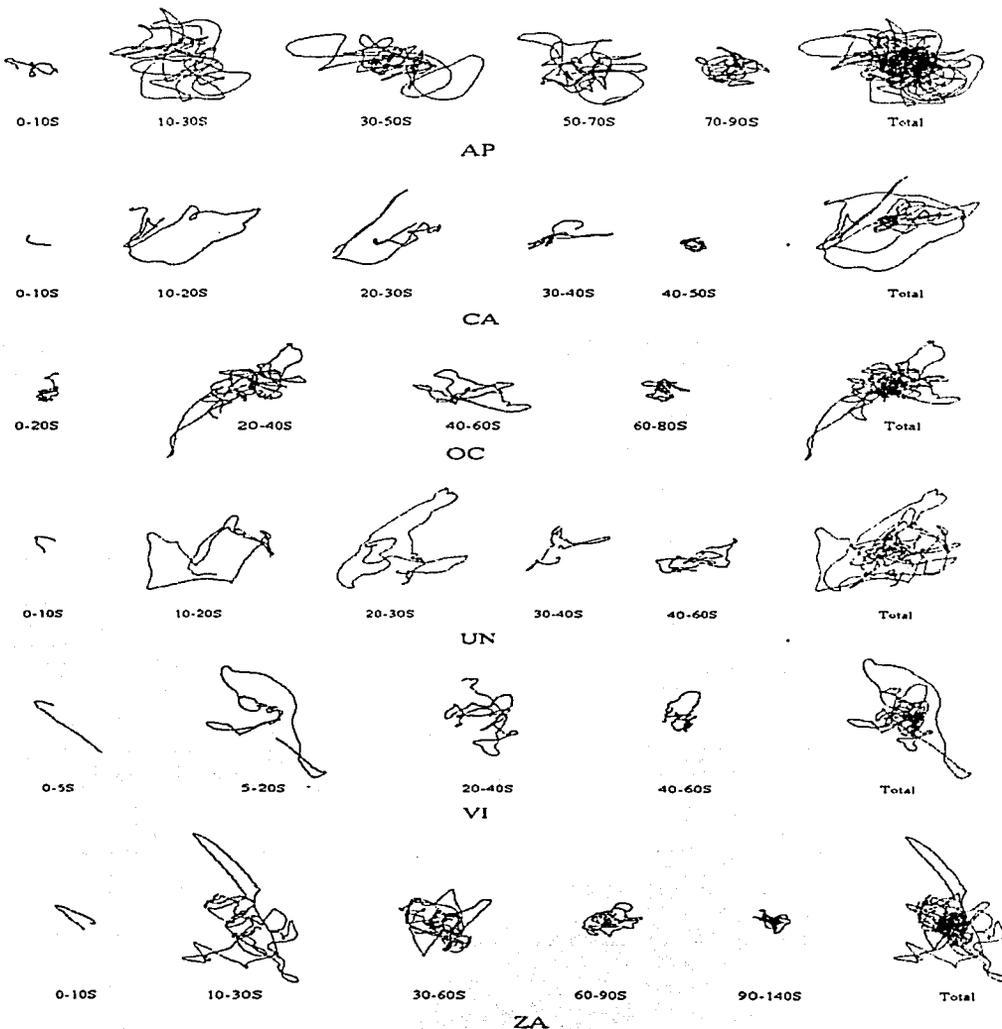


Figura 3.16 Historia de desplazamiento por ventanas en el tiempo de algunas estaciones cercanas al epicentro para el sismo del 19 de septiembre de 1985

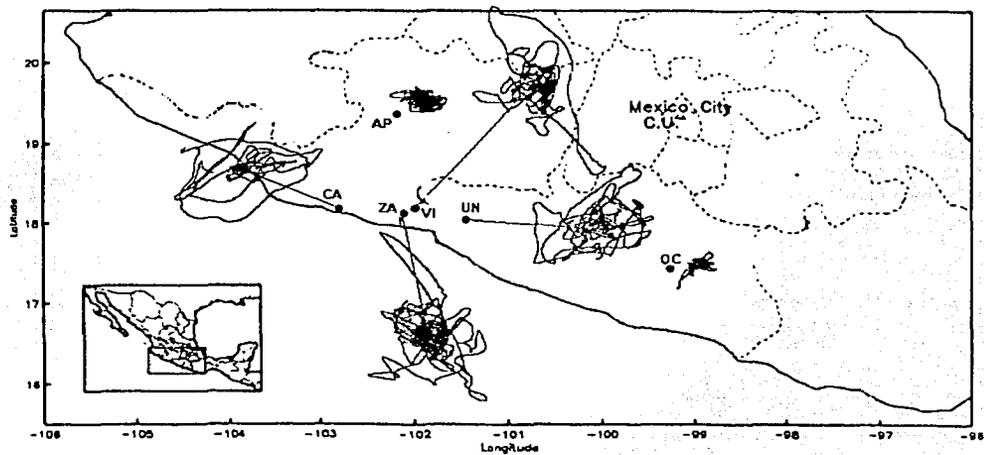


Figura 3.17 Historia de desplazamiento en el tiempo (odogramas), de algunas estaciones cercanas al epicentro para el sismo del 19 de septiembre de 1985

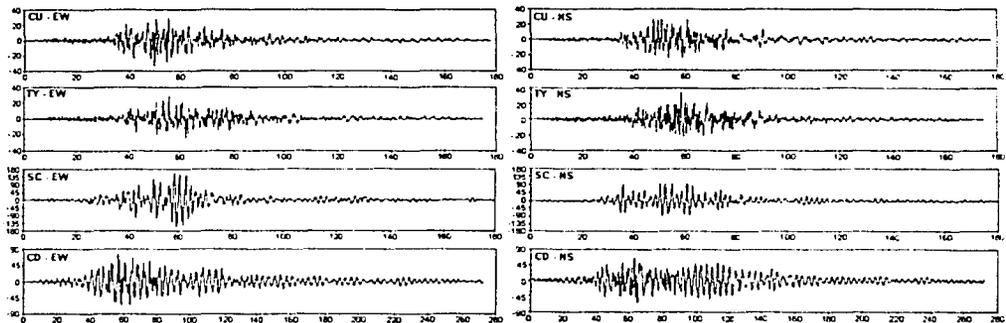


Figura 3.18 Historia de aceleración en el tiempo para algunas estaciones del Valle de México para el sismo del 19 de septiembre de 1985

De los espectros de aceleración (figura 3.15) y de los odogramas para cada una de estas estaciones (figura 3.16) se puede ver como se presenta mayor energía en cercanías de la fuente (estaciones CA, ZA, VI y UN) que en puntos algo distantes (estaciones OC y AP), esto debido a que se ven afectados por atenuación de la energía por trayectoria.

En un análisis más detallado de estas historias de desplazamiento en el tiempo (figura 3.16) se puede apreciar para las estaciones AP y OC las cuales se encuentran a considerable distancia de la fuente, que el intervalo de tiempo de arribo de las primeras ondas (ondas P) nos muestra una tendencia al desplazamiento en la dirección de arribo de las ondas, algo ya observado en el análisis del sismo del 15 de junio de 1999. De esta figura (figura 3.16) es evidente el posterior arribo de las ondas transversales.

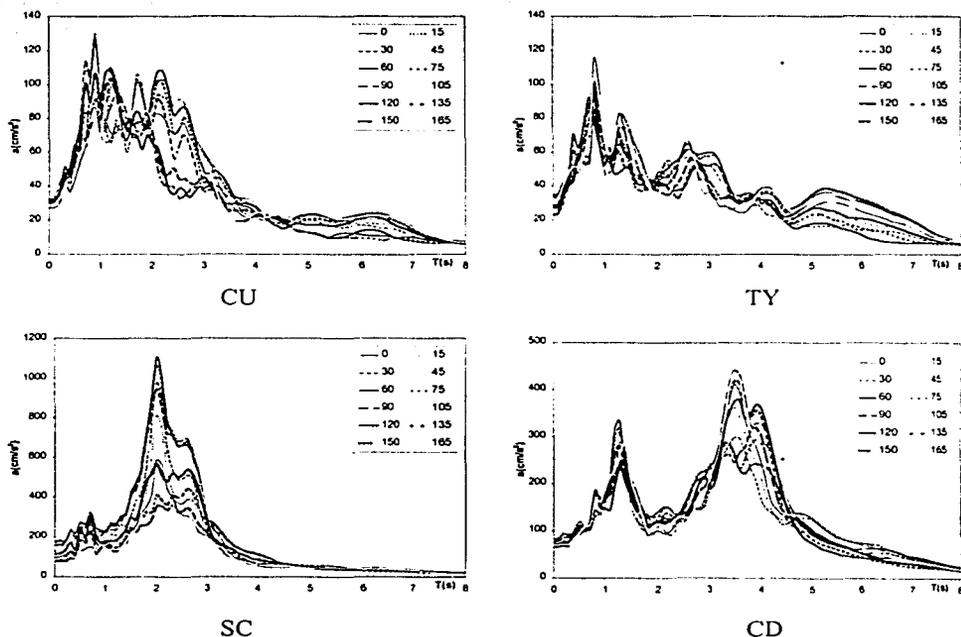


Figura 3.19 Espectros de aceleración de algunas estaciones del Valle de México para el sismo del 19 de septiembre de 1985

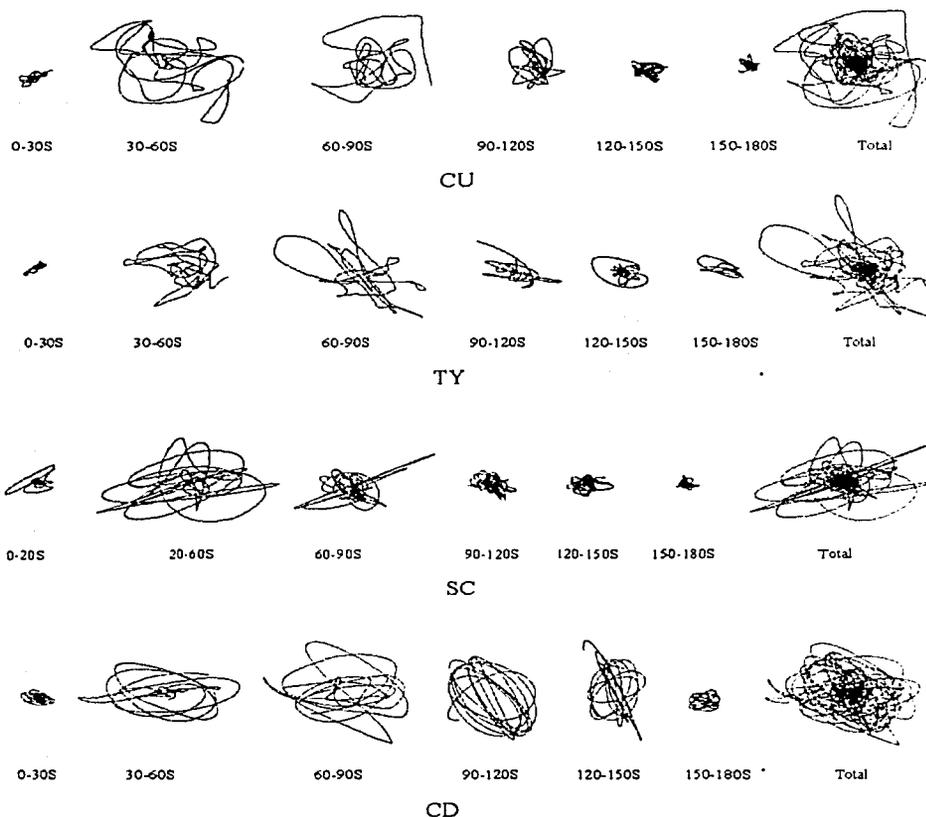


Figura 3.20 Historia de desplazamiento por ventanas en el tiempo de algunas estaciones del Valle de México para el sismo del 19 de septiembre de 1985

Al apreciar lo ocurrido en el Valle de México, es notable la mayor duración de los registros de terreno blando (figura 3.18) resaltando en este último la mayor amplificación producto de los efectos de sitio presentada es la estación SC.

De los espectros de respuesta (Figura 3.19) vemos de nuevo que el comportamiento para las diferentes direcciones dentro del plano horizontal es distinto presentando una mayor diferencia en periodos cercanos al periodo del sitio. Nuevamente podemos apreciar como dentro del valle en periodos cercanos a 3 s se presenta energía con diferente comportamiento dentro del plano horizontal para las distintas direcciones analizadas. En este caso, la dirección preferencial de esta energía para los diferentes sitios estudiados dentro del Valle es la misma y corresponde a N60E.

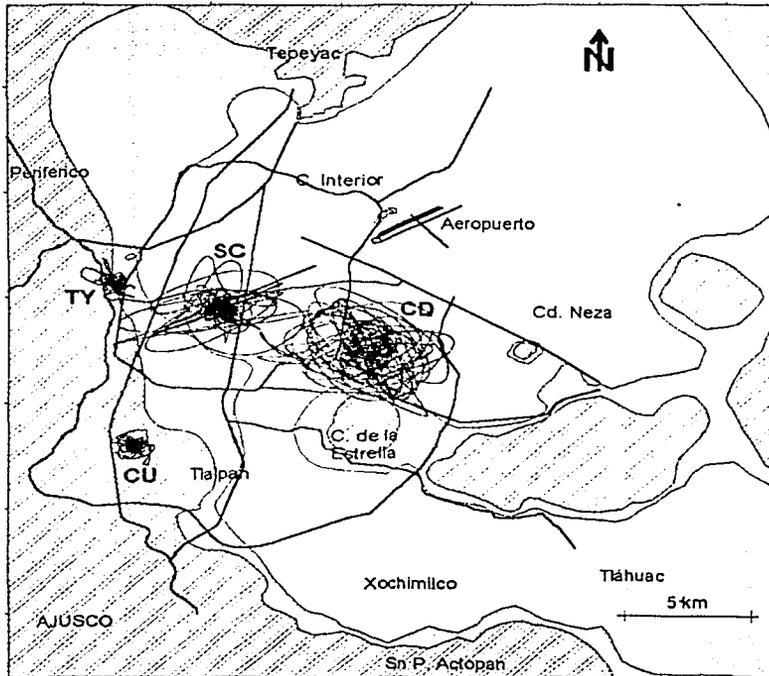


Figura 3.21 Historia de desplazamiento en el tiempo (odogramas), de algunas estaciones del Valle de México para el sismo del 19 de septiembre de 1985

La máxima respuesta de los espectros de la figura 3.19 se aprecia en el periodo dominante del suelo; en suelo firme esta diferencia entre la dirección de menor

amplificación y mayor amplificación de la energía llega a ser de  $35 \text{ cm/s}^2$  para un periodo de 0.8 s en la estación CU, mientras que para suelo blando esta diferencia llega a ser de  $750 \text{ cm/s}^2$  en un periodo de 2 s en la estación SC (figura 3.19).

En los odogramas por ventanas de cada una de las estaciones del Valle (figura 3.20), se puede apreciar que la dirección preferencial del movimiento es la dirección de incidencia de las ondas como ya se había apreciado en el estudio del sismo del 15/06/99. Para las demás ventanas en de tiempo en los odogramas se aprecia un comportamiento similar al ya visto teniendo en cuenta la dirección de incidencia de las ondas sísmicas.

### 3.3 Sismo del 14 de septiembre de 1995

Para el sismo del 14 de septiembre de 1995 al analizar estaciones dentro y fuera del Valle, se puede apreciar que teniendo en cuenta la dirección de incidencia de este evento, el comportamiento del movimiento del terreno mantiene las mismas características observadas en los dos sismos analizados anteriormente.

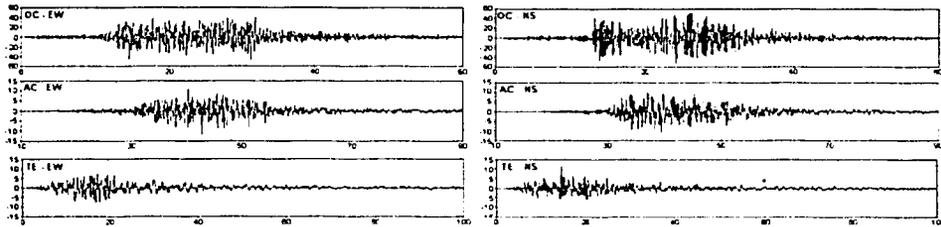


Figura 3.22 Historia de aceleración en el tiempo para algunas estaciones cerca del epicentro para el sismo del 14 de septiembre de 1995

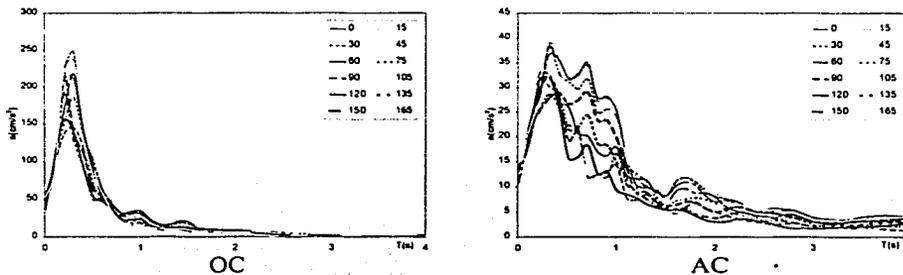


Figura 3.23 Espectros de aceleración de algunas estaciones cerca del epicentro para el sismo del 14 de septiembre de 1995

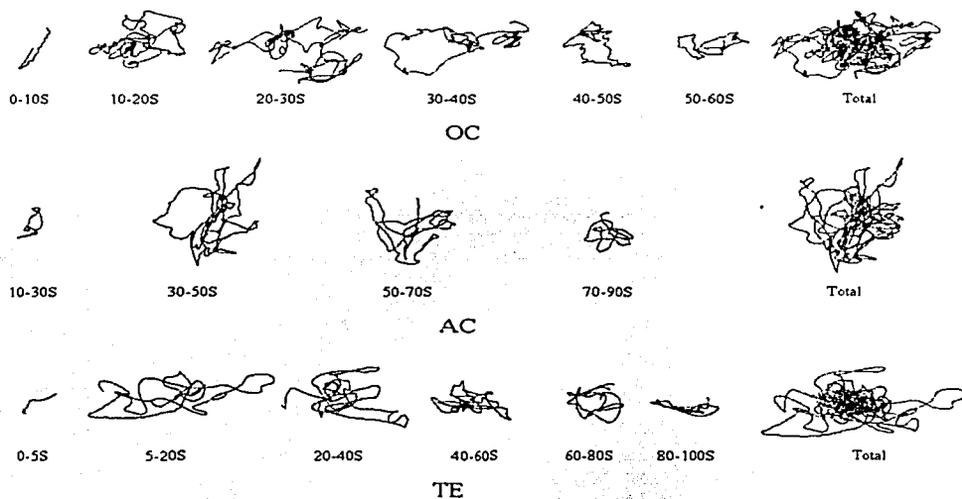


Figura 3.24 Historia de desplazamiento por ventanas en el tiempo de algunas estaciones cerca del epicentro para el sismo del 14 de septiembre de 1995

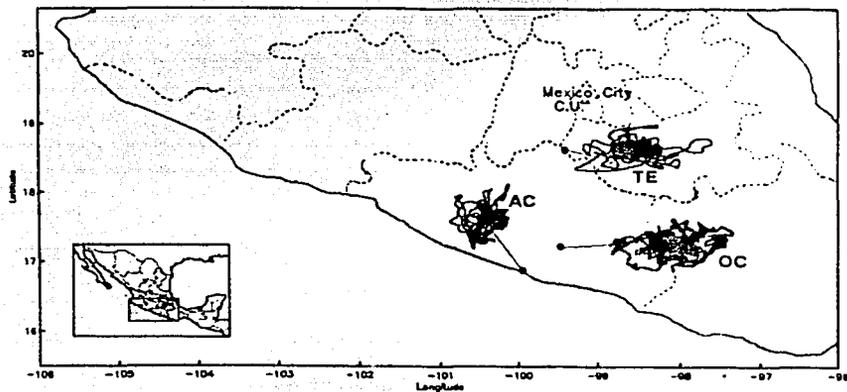


Figura 3.25 Historia de desplazamiento en el tiempo (odogramas), de algunas estaciones cercanas al epicentro para el sismo del 14 de septiembre de 1995

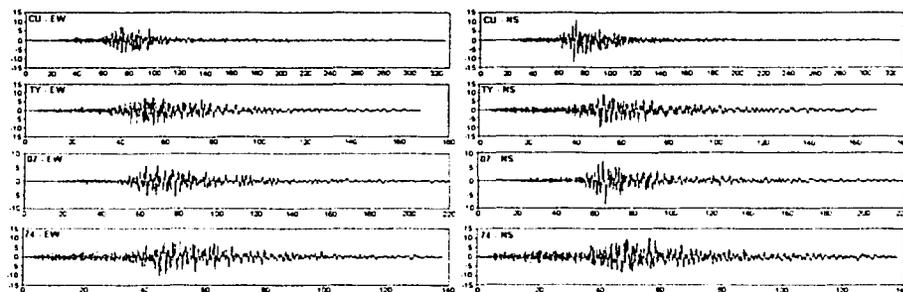


Figura 3.26 Historia de aceleración en el tiempo para algunas estaciones de suelo firme del Valle de México para el sismo del 14 de septiembre de 1995

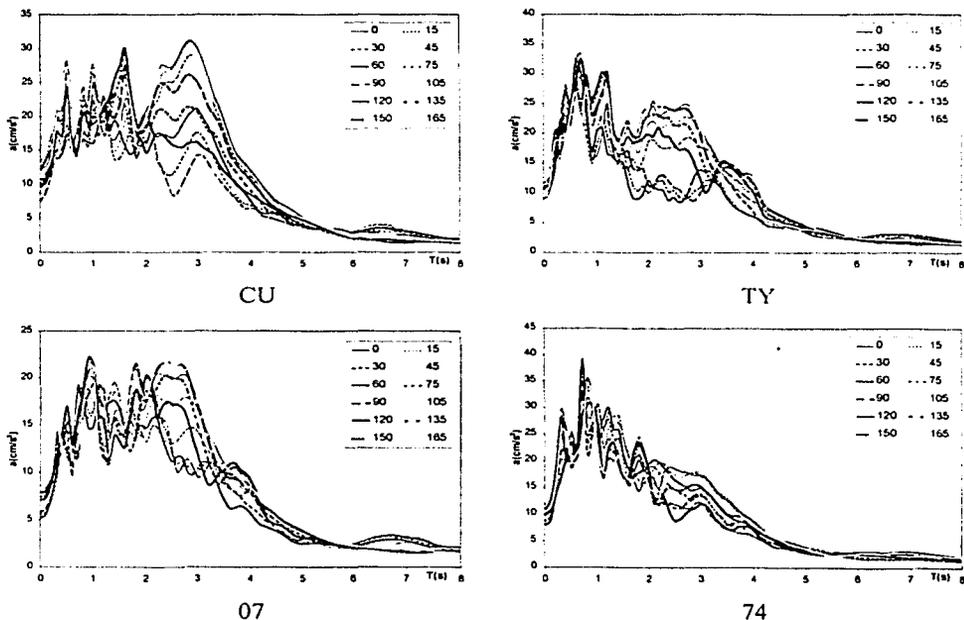


Figura 3.27 Espectros de aceleración de algunas estaciones de suelo firme del Valle de México para el sismo del 14 de septiembre de 1995

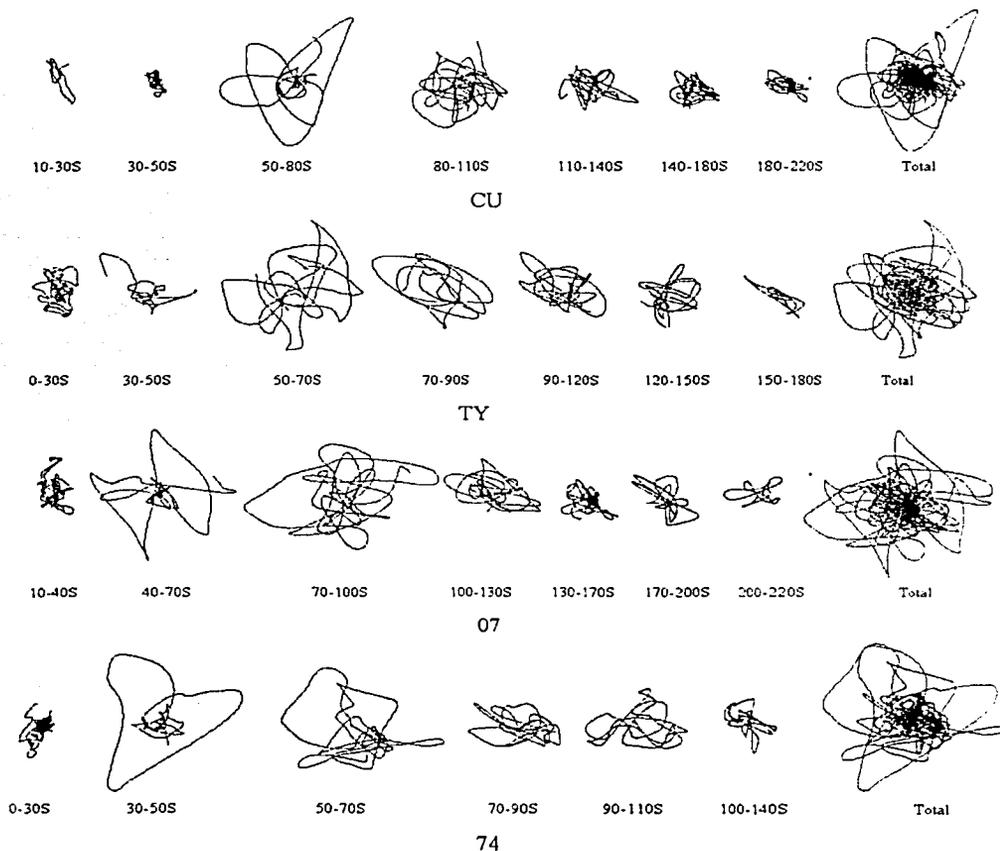


Figura 3.28 Historia de desplazamiento por ventanas en el tiempo de algunas estaciones de suelo firme del Valle de México para el sismo del 14 de septiembre de 1995

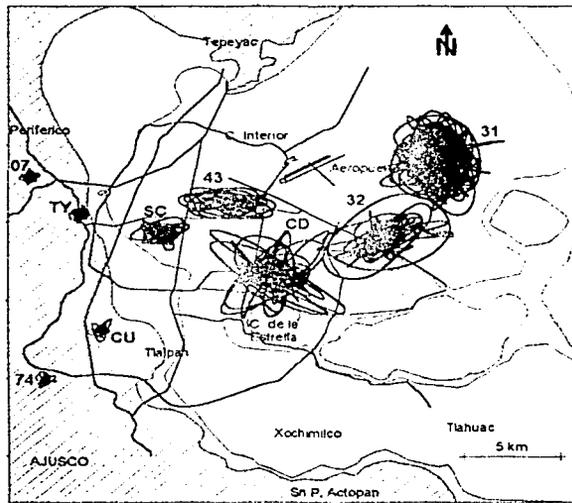


Figura 3.29 Historia de desplazamiento en el tiempo (odogramas), de algunas estaciones del Valle de México para el sismo del 14 de septiembre de 1995

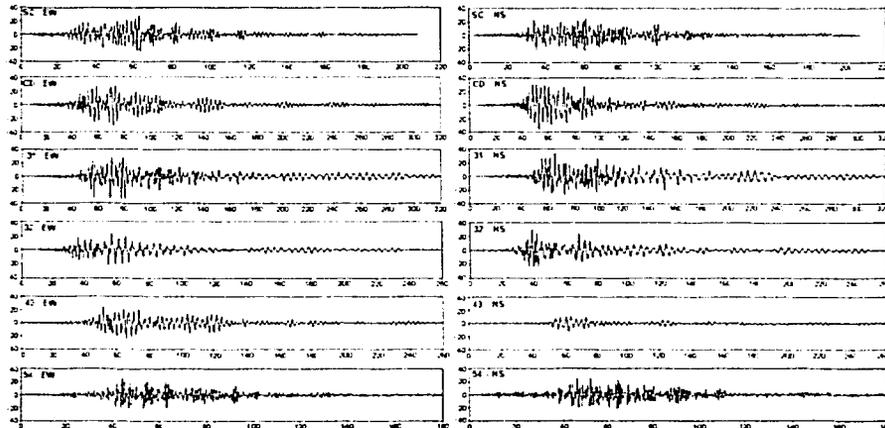


Figura 3.30 Historia de aceleración en el tiempo para algunas estaciones de suelo blando del Valle de México para el sismo del 14 de septiembre de 1995

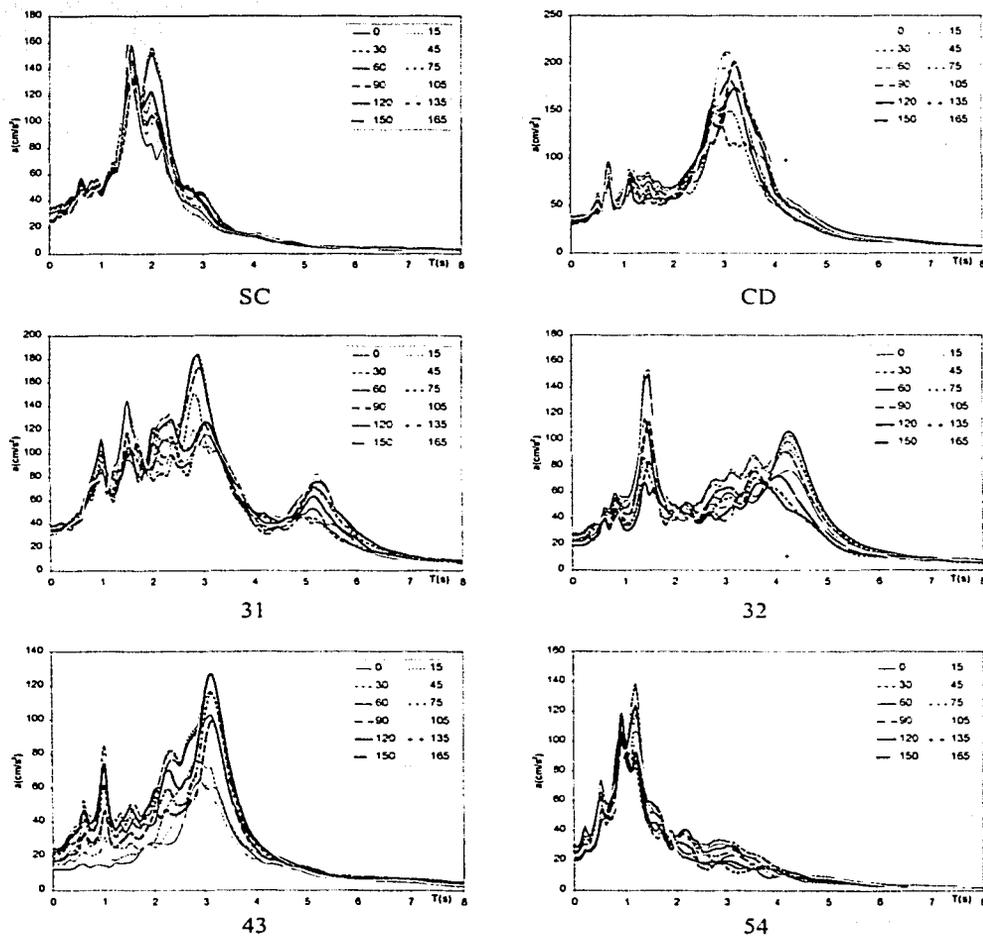


Figura 3.31 Espectros de aceleración de algunas estaciones de suelo blando del Valle de México para el sismo del 14 de septiembre de 1995

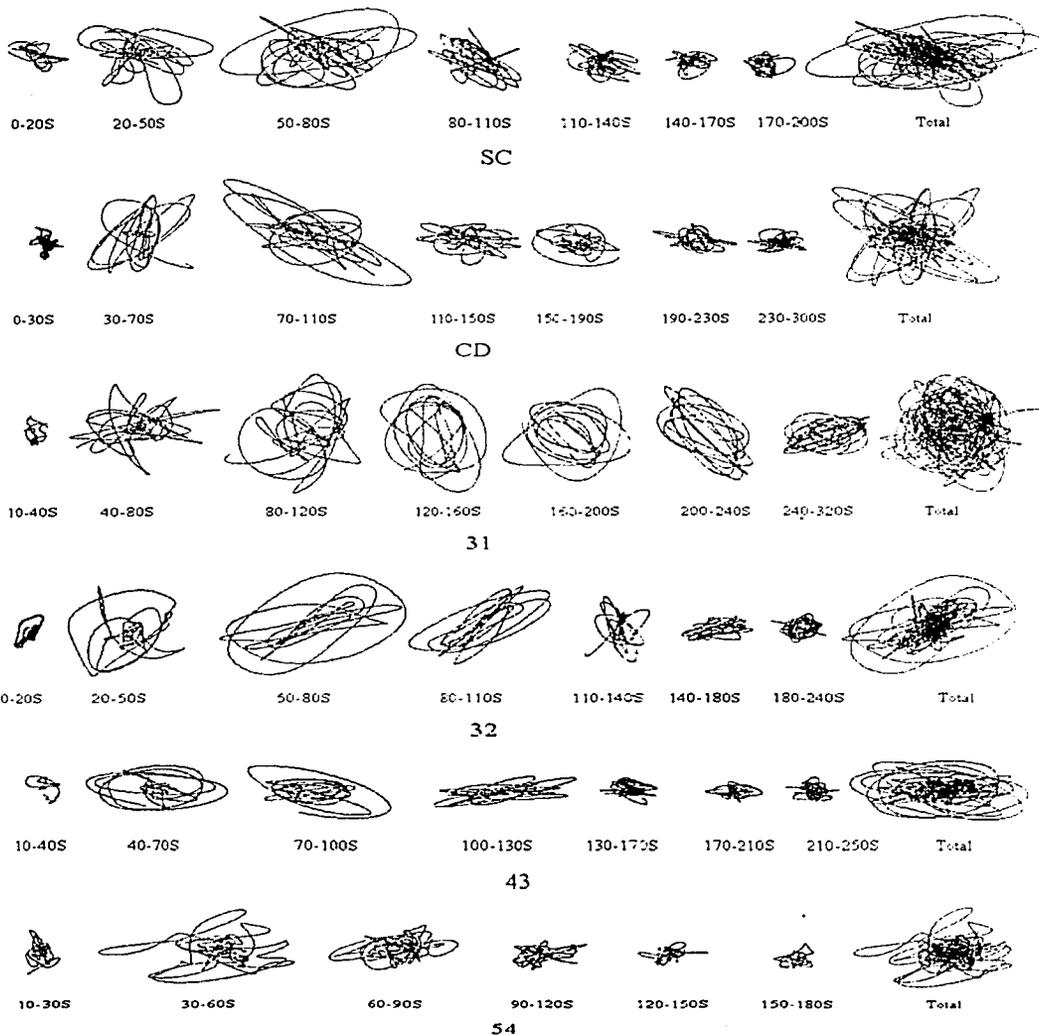


Figura 3.32 Historia de desplazamiento por ventanas en el tiempo de algunas estaciones de suelo Blando del Valle de México para el sismo del 14 de septiembre de 1995

Se aprecia de los espectros de respuesta de las estaciones dentro del Valle (figuras 3.27 y 3.31) que existe energía con diferente comportamiento dentro del plano horizontal alrededor de 3 s. Para las estaciones de suelo firme, se tiene una misma dirección preferencial de esta energía que corresponde a N00E. En el caso de suelo blando las estaciones CD, 32 y 54 presentan la misma dirección preferencial (N030E).

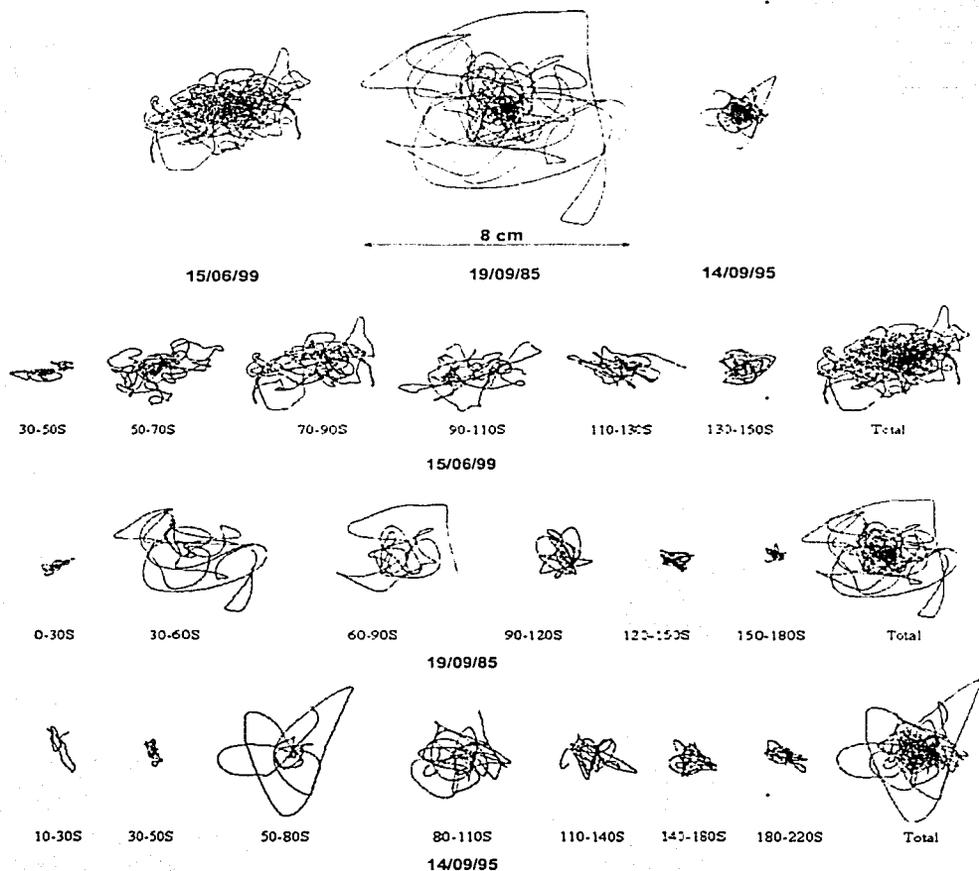


Figura 3.33 Movimiento del suelo de la estación CU para los tres sismos analizados en este capítulo

Al comparar el movimiento del suelo para el caso de los tres sismos estudiados en la estación CU (figura 3.33), podemos apreciar en cada uno de los casos que para la etapa inicial el suelo responde en el sentido de arribo de las ondas. Para el período de tiempo donde se presentan las ondas S, parece ser que el suelo responde independiente de la dirección de incidencia de las ondas sísmicas, al igual que en la etapa donde se presentan las ondas superficiales. Esta comparación nos indica que es posible que los efectos regionales que afectan al Valle de México generen un comportamiento del suelo que no dependa de la dirección de incidencia de las ondas sísmica a excepción de la etapa de arribo de las ondas P donde es evidente su dirección preferencial.

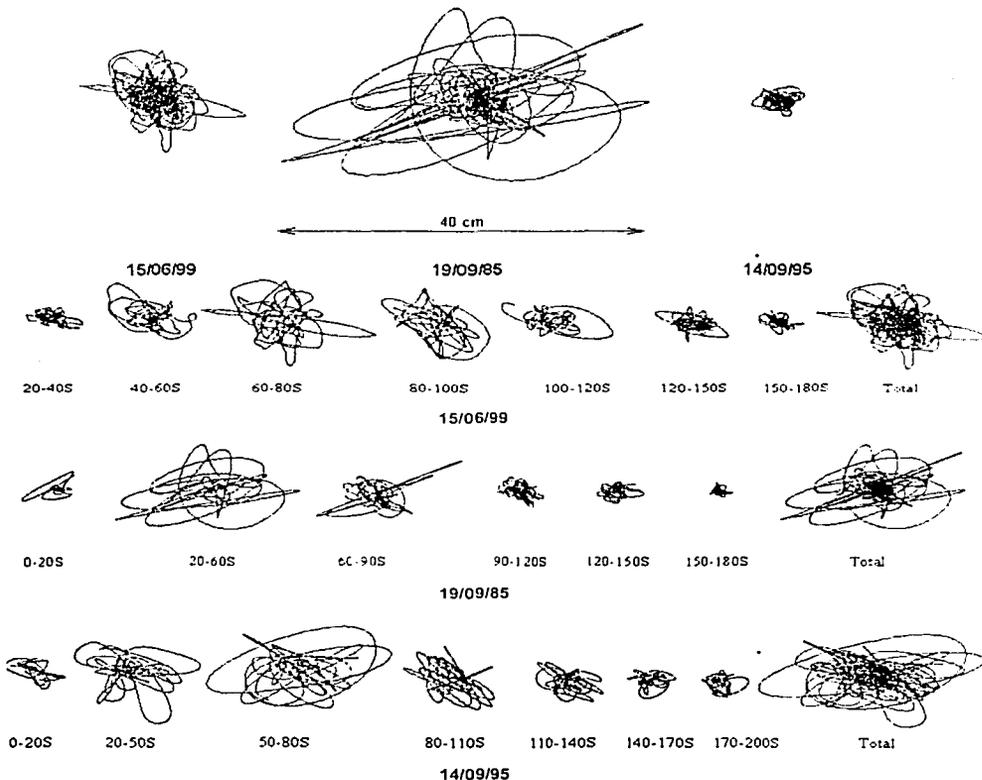


Figura 3.34 Movimiento del suelo de la estación SC para los tres sismos analizados en este capítulo

Al analizar el comportamiento del movimiento en el suelo blando, para la estación SC (figura 3.34), encontramos que se repiten las características encontradas en suelo firme ya que las ondas P presentan en el suelo una dirección preferencial en sentido de su arribo, mientras que las ondas S y las ondas superficiales para los tres sismos estudiados, muestran una tendencia al desplazamiento en dirección E-W, el cual podría ser atribuido a los efectos de sitio.

Se pudo apreciar de los resultados obtenidos para estos tres sismos tanto para suelo firme como para suelo blando, que el suelo no presenta un comportamiento uniforme en el plano horizontal, presentándose la mayor diferencia en periodos muy cercanos al periodo representativo del sitio de la estación. Esta diferencia en el comportamiento cerca al periodo del suelo esta directamente relacionada para un sitio con la magnitud del evento.

Analizando detalladamente todos los espectros de respuesta del Valle de México estudiados en este capítulo, vemos que respecto al comportamiento de la energía presentada alrededor de un periodo de 3 s, se puede pensar que para estaciones de suelo firme, la dirección preferencial de ésta varía en función a la dirección de incidencia de las ondas sísmicas ya que para cada sismo analizado esta dirección correspondía o estaba muy cerca de la dirección de incidencia de las ondas al Valle. En cuanto al comportamiento de ésta energía en suelo blando, se puede ver como en este caso dominan los efectos de sitio, ya que para el caso de la estación SC, y los tres sismos estudiados la dirección preferencial de la energía cercana a 3 s fue la misma.

### **3.4 Tendencia de la energía sísmica en el Valle de México y efectos de sitio**

Para apreciar detalladamente lo ocurrido en suelo blando debido a los efectos de sitio, se estudian los cocientes de Fourier de las estaciones SC y CD respecto a la estación CU para tres sismos con diferente dirección de incidencia y magnitud.

Para un sitio en específico, un espectro de Fourier nos muestra la composición del sismo en el dominio de la frecuencia. Es por ello que de estos espectros podemos obtener las frecuencias mayor concentradas o más amplificadas por las diferentes propiedades del terreno. Si el terreno es uniforme para dos estaciones relativamente cercanas, deberíamos esperar la misma respuesta o composición en frecuencias para sus correspondientes espectros de Fourier. Esto no es necesariamente lo que ocurre en el Valle de México, debido a la notable variación en la profundidad de lo que podríamos llamar suelo blando sobre el que esta cimentado el DF.

Si, para dos estaciones ubicadas sobre suelo de características muy parecidas se obtienen sus espectros de Fourier y se realiza el cociente entre ellos, debería obtenerse una gráfica donde la variación de la amplificación respecto a la frecuencia sería casi uniforme. Se esperaría lo mismo si realizo el cociente de Fourier de lo observado en una estación de suelo firme y lo registrado para cualquier estación cercana pero a una profundidad tal que las características del suelo correspondan o se acerquen a las del suelo firme, o sea bajo el estrato que hemos denominado suelo blando. Siendo así,

podríamos decir que si hallamos el cociente de Fourier de una estación de suelo blando respecto a una en suelo firme relativamente cercana, obtendremos la respuesta en el dominio de la frecuencia producto del paso de las ondas a través del estrato blando.

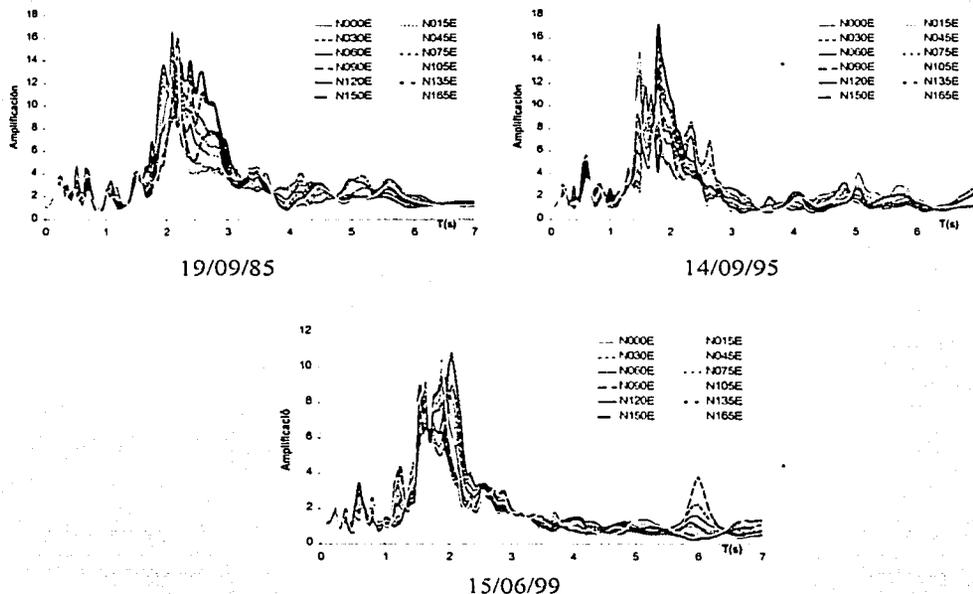


Figura 3.35 Cocientes de Fourier para diferentes direcciones en el plano horizontal de la estación SC respecto a la estación CU

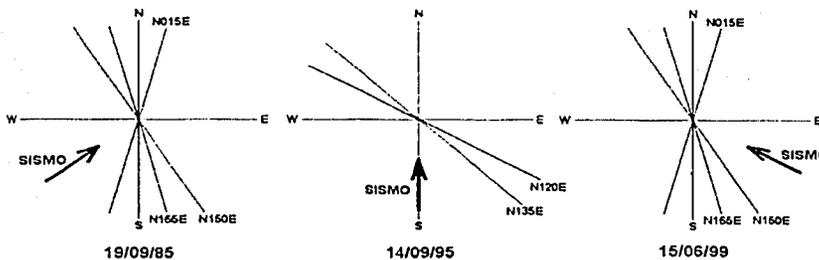


Figura 3.36 Dirección preferencial de la energía amplificada por efectos de sitio en la estación SC

De los cocientes de Fourier rotados para la estación SC (Figura 3.35), se aprecia que para los sismos del 19/09/85 y 15/06/99 se presenta la misma tendencia de dirección preferencial de la energía amplificada por los efectos de sitio. Para el sismo del 14/09/95 aunque la dirección preferencial no es la misma que en los dos sismos anteriores, esta es bastante cercana. En la figura 3.36 se muestra las direcciones en las que se presenta la máxima amplificación de la energía debido a efectos de sitio.

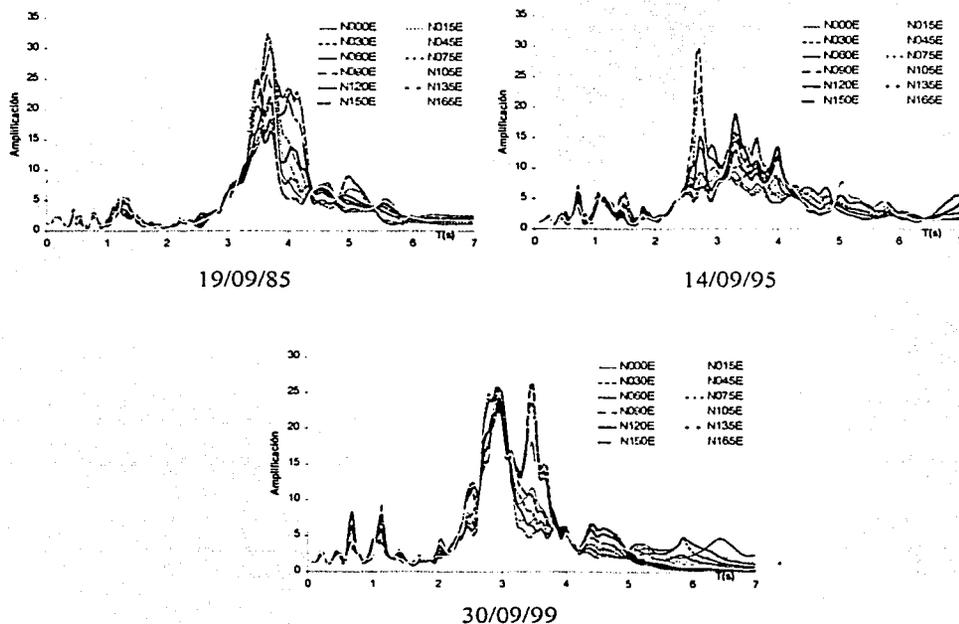


Figura 3.37 Cocientes de Fourier para diferentes direcciones en el plano horizontal de la estación CD respecto a la estación CU

Para la estación CD al igual que para la estación SC se analizan tres sismos con diferente dirección de incidencia. Esta estación no registró para el sismo del 15/06/99 por lo tanto se utiliza el sismo del 30/09/99 ( $M=7.4$ , Falla normal) que tiene similar dirección de incidencia al Valle. Se aprecia en los cocientes de Fourier rotados (figura 3.37) que para los sismos no se presenta dirección preferencial similar.

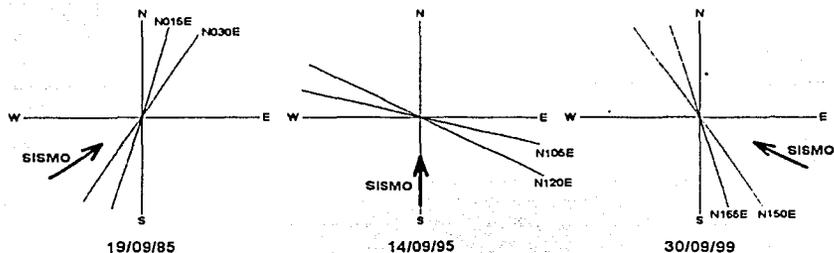


Figura 3.38 Dirección preferencial de la energía amplificada por efectos de sitio en la estación CD

Como se aprecia en la figura 3.38, para ninguno de los tres sismos se tiene igual dirección preferencial, lo que nos muestra lo variado del comportamiento debido a los efectos de sitio en los diferentes lugares de suelo blando. Si bien, para el caso de la estación SC se presenta dirección preferencial muy parecida para los tres sismos estudiados, esto no indica que al dominar los efectos de sitio la respuesta en suelo blando, se presente dirección preferencial de estos efectos independiente de la dirección de incidencia de las ondas sísmicas como se vera mas adelante al estudiar mas sismos en varias estaciones del Valle de México.

Con el fin de analizar con mas detalle el comportamiento del Valle ante sismos se toman los registros acelerométricos de una colección de los principales sismos en las estaciones CU en suelo firme y SC en suelo blando, se descomponen estos en diferentes ejes ortogonales dentro del plano horizontal con el fin de conocer en general el comportamiento del suelo en el plano, luego se calculan espectros de aceleración para cada una de las direcciones rotadas, de esta forma se calcula la dirección donde el suelo sufrió la mayor excitación debido a las ondas sísmicas. La tabla 3.3 muestra la colección de sismos utilizados para este fin y en la fig. 3.39 se presentan localizados sobre el mapa de la República Mexicana estos sismos.

Al realizar el análisis propuesto para la estación CU se obtienen los espectros de aceleración ilustrados en la fig. 3.40 y los resultados contenidos en la tabla 3.4. No se aprecia ninguna tendencia del comportamiento al correlacionar estos resultados respecto a la magnitud y al azimut de entrada de las ondas sísmicas.

De manera similar para la estación SC se presentan en la fig. 3.41 los espectros de aceleración rotados y los resultados obtenidos en la tabla 3.5. En este caso tampoco se observa correlación entre estos datos y la magnitud y el azimut de entrada de las ondas sísmicas.

Tabla 3.3 Características de algunos sismos representativos

#	Fecha	Origen	Brecha	M	Lat.	Long.	Prof	Dist-CU	Azmut CU'
12	19.09.85	Sub	Michoacán	8.1	18.08	102.94	15	430	255
36	24.10.93	Sub	Ometepec	6.6	16.54	98.98	19	300	170
46	09.06.94	Norm	Oax.Este	6.2	15.69	96.37	33	500	140
47	04.07.94	Sub	---	5.9	14.83	97.29	31	530	155
48	12.07.94	Norm	---	4.5	18.12	100.5	62	200	225
50	10.12.94	Sub	Ometepec	6.6	15.81	98.79	20	290	170
52	14.09.95	Sub	Ometepec	7.4	17	99	45	260	170
67	11.01.97	Norm	Michoacán	7.1	18	102.55	35	400	250
75	22.05.97	Norm	Michoacán	6.5	18.37	101.82	54	310	255
--	16.12.97	Sub	Ometepec	5.5	15.7	99.04	16	400	177
--	22.12.97	Sub	Petatlán	5	17.14	101.24	5	330	220
--	03.02.98	Norm	Oaxaca Este	6.2	15.69	96.37	33	506	145
76	20.04.98	Norm	---	5.9	18.37	101.21	66	250	245
--	11.07.98	Sub	Petatlán	4.7	17.25	101.5	5	342	229
--	17.07.98	Sub	Guerrero	4.6	16.98	100.16	27	280	204
77	15.06.99	Norm	---	6.5	18.18	97.51	69	230	120
78	21.06.99	Norm	Michoacán	6.3	18.15	101.72	54	310	245
79	30.09.99	Norm	Oax. Central	7.4	15.95	97.03	55	440	145

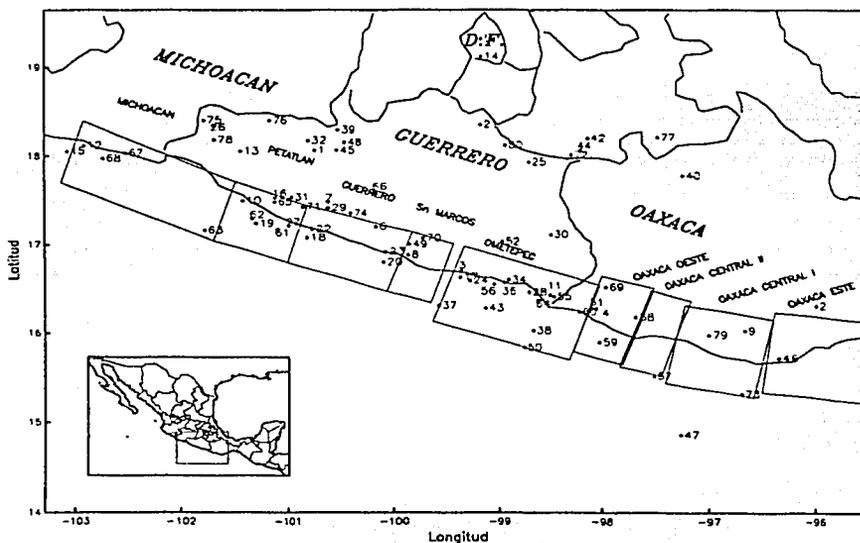


Figura 3.39 Epicentro de sismos registrados en la estación CU

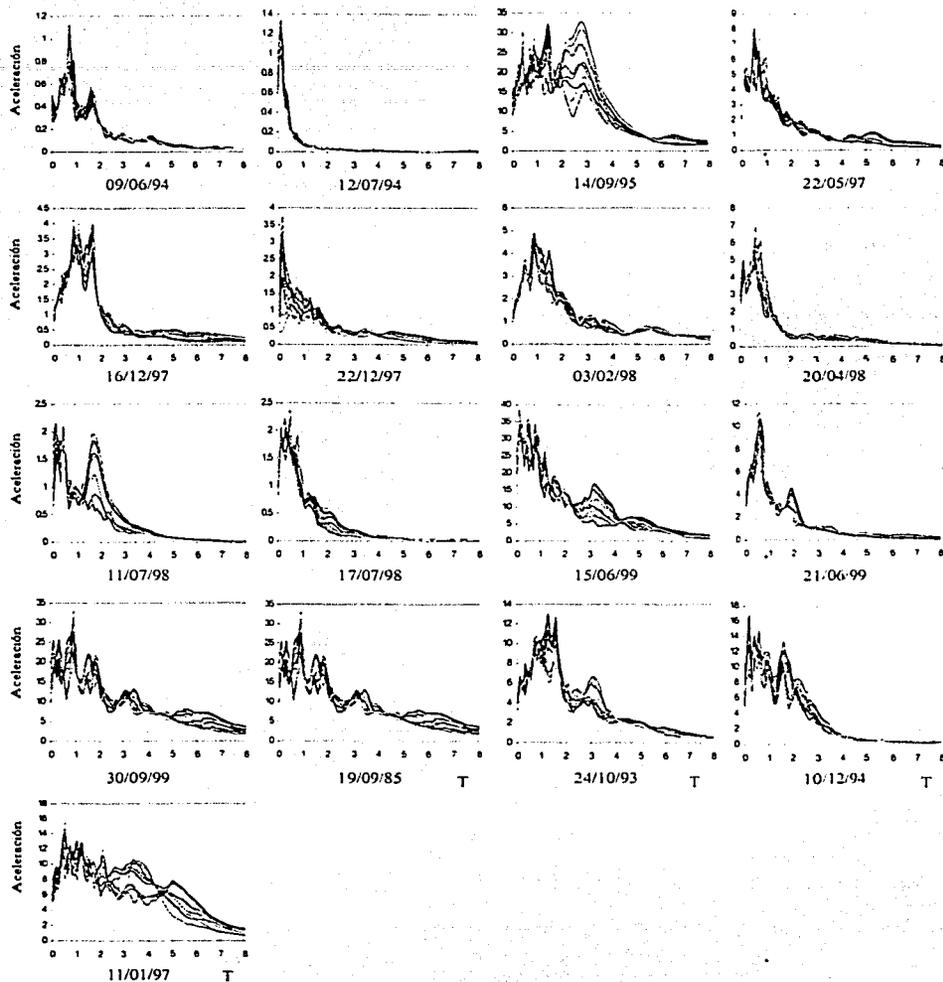


Figura 3.40 Espectros de aceleración de la estación CU rotados en el plano horizontal

Tabla 3.4 Características de algunos sismos representativos registrados en la estación CU

#	Fecha	Origen	Brecha	Estacion CU			
				M	Azimet CU	Dirección Max. Amplificación *	Dirección Max. Amplificación T=Ts *
12	19/09/85	Sub	Michoacán	8.1	255	90	90
36	24/10/93	Sub	Omotepec	6.6	170	120	135
46	09/06/94	Norm	Oax. Este	6.2	140	105	135
47	04/07/94	Sub	---	5.9	155	120	105
48	12/07/94	Norm	---	4.5	225	90	90
50	10/12/94	Sub	Omotepec	6.6	170	105	60
52	14/09/95	Sub	Omotepec	7.4	170	150	165
67	11/01/97	Norm	Michoacán	7.1	250	105	105
75	22/05/97	Norm	Michoacán	6.5	255	45	105
--	16/12/97	Sub	Omotepec	5.5	177	180	180
--	22/12/97	Sub	Petatlan	5	220	90	105
--	03/02/98	Norm	Oaxaca Este	6.2	145	165	165
76	20/04/98	Norm	---	5.9	245	180	165
--	11/07/98	Sub	Petatlan	4.7	229	150	150
--	17/07/98	Sub	Guerrero	4.6	204	150	150
77	15/06/99	Norm	---	6.5	120	165	165
78	21/06/99	Norm	Michoacán	6.3	245	105	105
79	30/09/99	Norm	Oax. Central	7.4	145	165	180

(\*) Angulos medidos en dirección horaria desde la dirección N000E

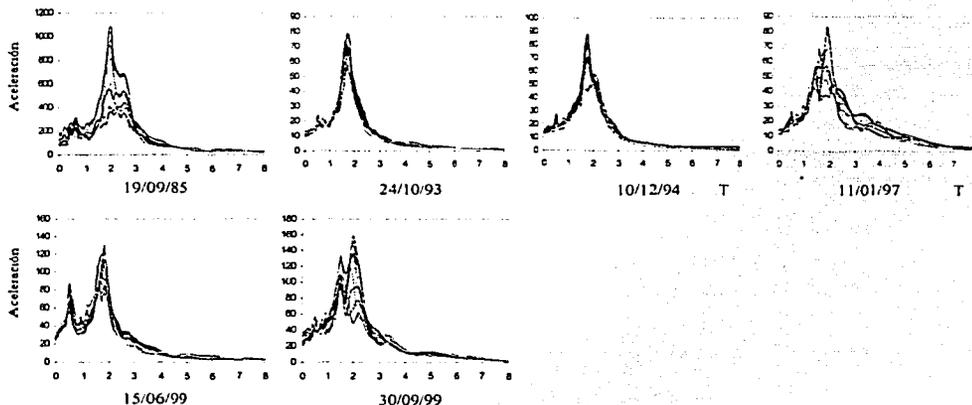


Figura 3.41 Espectros de aceleración de la estación SC rotados en el plano horizontal

Para las estaciones CU y SC, producto de los resultados acá obtenidos, resulta importante resaltar que las direcciones de mayor excitación del terreno están contenidas en un rango de valores que de manera gráfica se ilustran en la fig. 3.43. Esta área del plano resulta ser de especial cuidado en el momento del diseño de estructuras, ya que como se aprecia de los resultados obtenidos se convierte en la zona de mayor respuesta del suelo antes sismos.

Tabla 3.5 Características de algunos sismos representativos registrados en la estación SC

Estacion SC							
#	Fecha	Origen	Brecha	M	Azmut CU	Dirección Max. Amplificación T=Ts *	Dir. Max. Amplificación Cociente SC/CU T=Ts *
12	19/09/85	Sub	Michoacán	8.1	255	60	180
36	24/10/93	Sub	Ometepec	6.6	170	120	105
50	10/12/94	Sub	Ometepec	6.6	170	105	120
67	11/01/97	Norm	Michoacán	7.1	250	150	135
77	15/06/99	Norm	---	6.5	120	165	165
79	30/09/99	Norm	Oax. Central	7.4	145	150	180

(\*) Angulos medidos en dirección horaria desde la dirección N000E

Con el fin evaluar los efectos del sitio mediante este mismo análisis, para la estación SC se realizan los cocientes de Fourier respecto a la estación CU (fig. 3.42) para los sismos de la tabla 3.5 en la que también se encuentran los resultados obtenidos. Estos muestran que al igual que de los espectros de aceleración, no se aprecia tendencia al correlacionarlos con la magnitud y el azmut de entrada de las ondas sísmicas

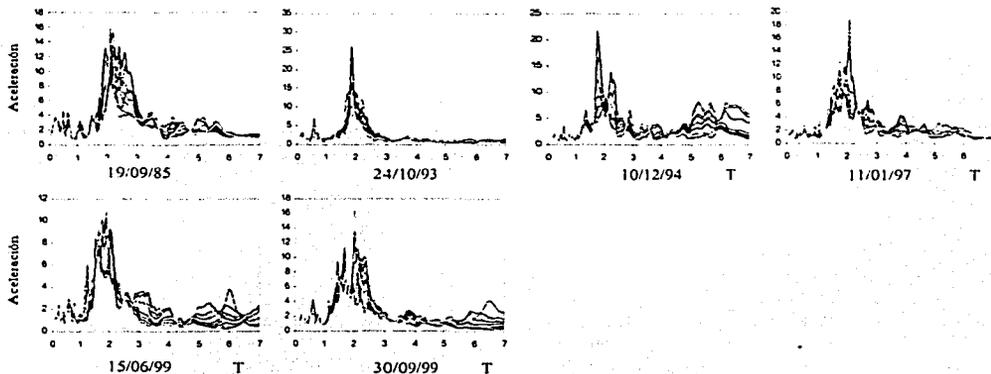


Figura 3.42 Cocientes de Fourier de la estación SC respecto a CU rotados en el plano horizontal

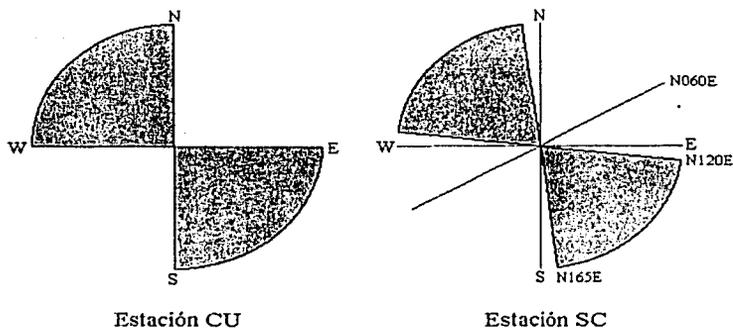


Figura 3.43 Zonas de mayor amplificación de la respuesta sísmica del suelo

Con el fin de contar con mayor información del Valle de México respecto a la dirección de máxima amplificación a continuación se presentan los resultados obtenidos mediante el mismo análisis realizado en las estaciones CU y SC para las estaciones 7, 8, 13, 19, 22, 32, 33, 54, 74, CD y TY dentro del Valle. Los sismos con los que se calcula la dirección de máxima respuesta para cada estación se presentan en la tabla 3.6 al igual que la máxima respuesta en  $\text{cm/s}^2$  y el ángulo dentro del plano horizontal donde ésta se presentó medido desde la dirección N-S.

Tabla 3.6 Características de algunos sismos representativos para varias de las estaciones del Valle de México

Sismo	M	Aci	Estaciones																						
			7		8		13		19		22		32		33		54		74		CD		TY		
			Arg	A <sub>max</sub>	Arg	A <sub>max</sub>	Arg	A <sub>max</sub>	Arg	A <sub>max</sub>	Arg	A <sub>max</sub>	Arg	A <sub>max</sub>	Arg	A <sub>max</sub>	Arg	A <sub>max</sub>	Arg	A <sub>max</sub>	Arg	A <sub>max</sub>	Arg	A <sub>max</sub>	
12	190376	8.1	25																						
13	090288	5.7	23			30	17			15	13	120	19								150	441	180	113	
17	250489	6.9	16			120	275	165	55	180	132	135	145	15	113	120	229	15	232	30	74	180	173	150	37
-	020659	4.9	197			150	25	150	10	180	14	90	41												
18	110690	5.5	210			120	16	180	8			90	26			30	11	165	30	90	14			60	7.5
21	310650	5.9	210	150	88	90	37	135	14			105	65	165	14	45	31	-5	73	60	17	15	38		
33	241069	6.6	170	105	11	90	39	-6	19	150	90	120	85	165	13	90	37	-6	78	30	17	30	52		
52	140265	7.4	170			120	100	165	-6	15	294	30	171	-6	105	105	135	-6	147	60	39	30	211	165	33
53	091056	8.0	230	75	72	120	55	135	9	15	75	30	63	135	69	30	59	180	-9				50	137	
77	150399	6.5	120	60	27	165	112	30	55	165	99	90	145	30	65	75	97	165	235	45	130				
78	310310	7.4	145	15	19	135	109	30	-2	150	191	120	251	180	65	90	140	150	170			120	242	135	35

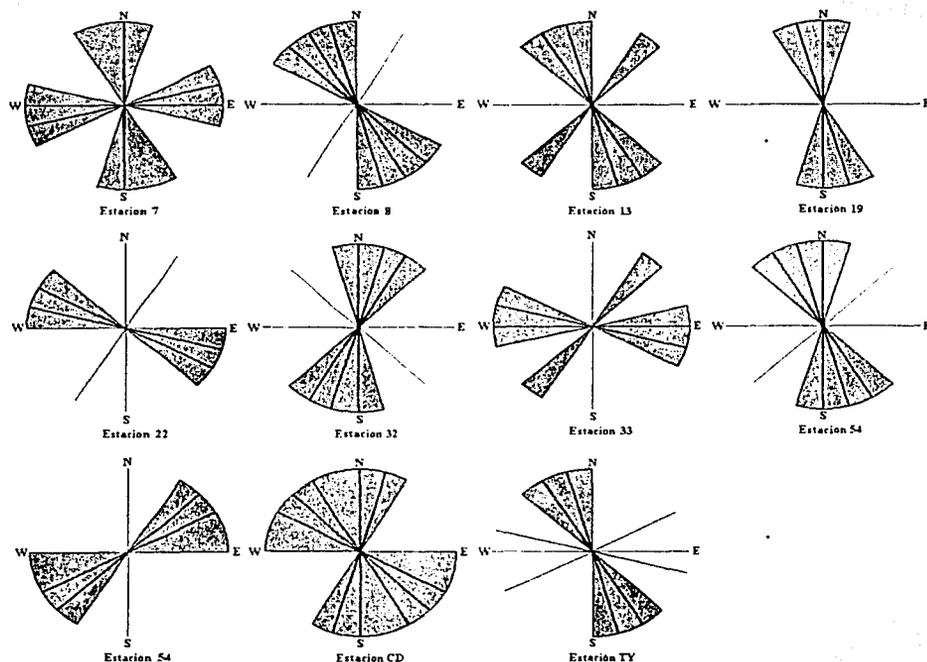


Figura 3.44 Zonas de mayor amplificación de la respuesta sísmica del suelo

Al relacionar los datos obtenidos de dirección de máxima respuesta y aceleración máxima (tabla 3.6) con la magnitud y el azimut de entrada de las ondas sísmicas al Valle se obtienen coeficientes de correlación bajos.

Para apreciar de una forma más clara para cada estación las direcciones donde se presentó el máximo valor de la respuesta, se ilustran en la figura 3.44 para cada estación los datos obtenidos graficados dentro del plano. Con sombra se muestran las zonas del plano que tienen una mayor tendencia a presentar el valor de máxima respuesta. En la figura 3.45 se tiene para cada una de las estaciones dentro del mapa del valle un promedio del valor presentado en cuanto a la dirección de máxima respuesta.

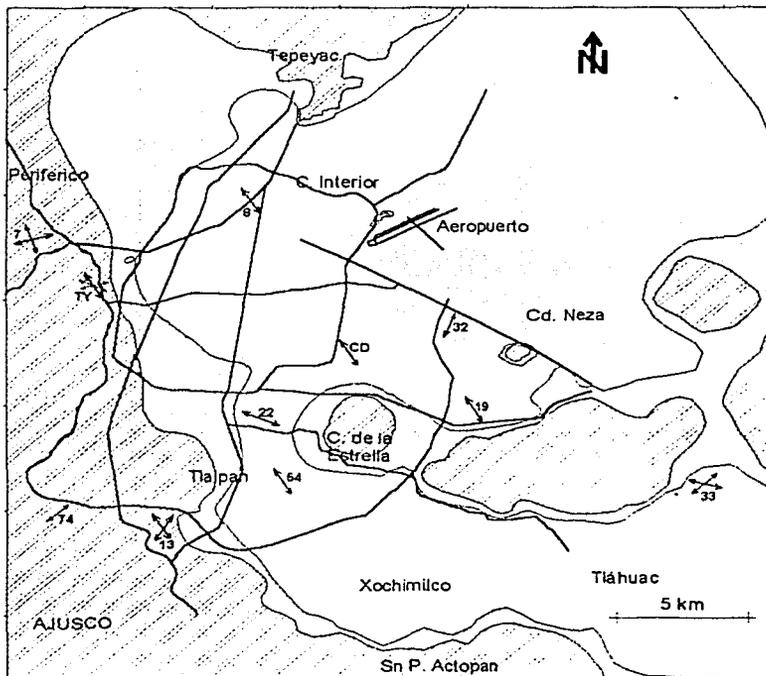


Figura 3.45 Tendencia de la respuesta sísmica del suelo en algunas estaciones del Valle de México obtenida mediante el análisis de espectros de respuesta

De la figura 3.45 se puede apreciar que las estaciones de suelo blando presentan cierta influencia por parte de las zonas de transición y firme lo que nos puede hacer pensar que su comportamiento se ve dominado por ondas generadas en las discontinuidades presentadas por estas zonas. En suelo firme no se aprecia alguna tendencia definida de dirección de máxima respuesta ratificando así lo obtenido en otros análisis.

Para evaluar los efectos de sitio de las estaciones de suelo blando estudiadas, se calculan cocientes de Fourier de cada una de éstas respecto a la estación TY, los resultados de dirección de máxima respuesta y amplificación máxima presentada se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Algunos resultados del análisis de cocientes de Fourier para estaciones de suelo blando en el Valle de México

Sismo	M	Azimut	Estaciones												CD			
			8		19		22		32		33		54		Ang	Amp		
			Ang	Amp	Ang	Amp	Ang	Amp	Ang	Amp	Ang	Amp	Ang	Amp	Ang	Amp		
12	19/09/85	8.1	255														90	8
16	08/02/88	5.7	230	165	27	165	58	120	10			180	30	165	13		90	22
17	25/04/89	6.9	185	75	32	75	17	15	20			180	20	165	10	105		9
..	02/05/89	4.9	187															
18	11/05/90	5.5	210	120	24			60	27				15	23	15	16		
20	31/05/90	5.9	210															
36	24/10/93	6.6	170															
52	14/09/95	7.4	170	45	27	45	41	45	20	30	12	45	28	60	14	45		7
53	09/10/95	8.0	260															
77	15/06/99	6.5	120															
79	30/09/99	7.4	145	135	16	165	31	150	35	165	9	75	27	180	11	90		41

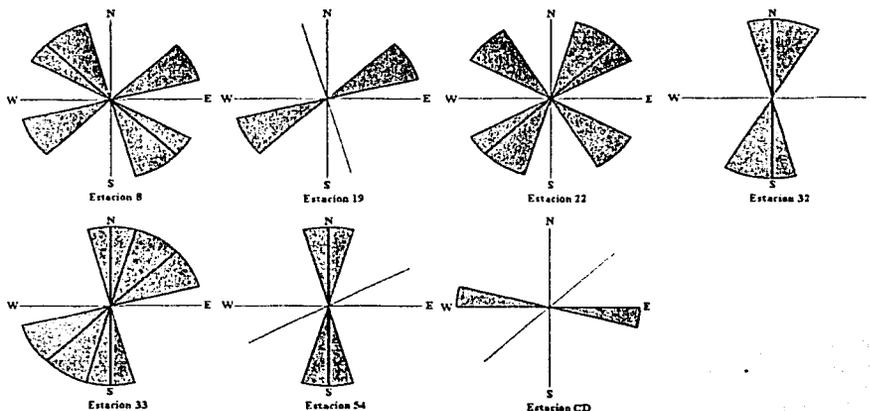


Figura 3.45 Zonas de mayor amplificación de la respuesta sísmica del suelo

Los resultados de la tabla 3.7 fueron graficados contra magnitud y azimut de entrada de las ondas sísmicas obteniéndose valores bajos de correlación al igual que lo presentado con los resultados de los espectros de aceleración del Valle en general.

La figura 3.45 presenta las direcciones de máxima amplificación de los cocientes para cada una de las direcciones mientras que en la figura 3.46 se presentan sus promedios en el mapa del Valle.

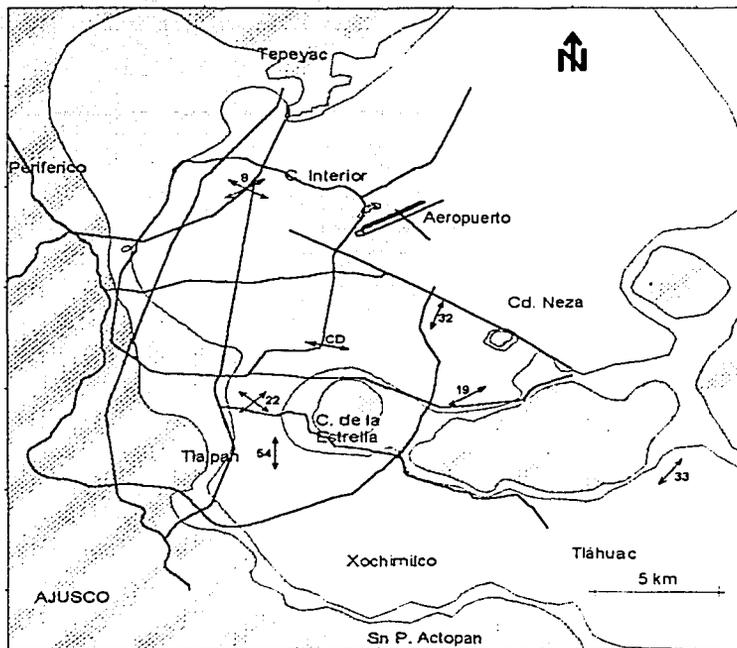


Figura 3.46 Tendencia de la respuesta sísmica del suelo en algunas estaciones del Valle de México obtenida mediante el análisis de cocientes de Fourier

Al analizar solo el efecto de la capa blanda de la zona de lago para las diferentes estaciones estudiadas ilustradas en la figura 3.46 se aprecia que en la tendencia vista mediante los espectros de aceleración de estas mismas estaciones no dominan los efectos de sitio si no la combinación de estos con lo registrado en roca, ya que los efectos de sitio para este conjunto de estaciones no muestran tendencia alguna.

## CAPITULO IV

### Energía sísmica, su variación y efectos ortogonales

Hasta el momento lo relacionado con la dirección de la máxima energía registrada en un sismo no ha sido muy estudiado. El actual reglamento de construcción para el Distrito Federal está basado principalmente en el registro E-W de SC del sismo del 19 de septiembre de 1985, para este sitio la diferencia en los espectros de respuesta obtenidos para el componente norte-sur y para el este-oeste es cercana al 60 por ciento, esto para el caso particular del valle de México no puede generalizarse debido a lo especial de su comportamiento por contar con suelos tan blandos y frecuencia alta de ocurrencia de sismos intensos que lo pueden afectar; es por esta razón que resulta de gran importancia el estudio no sólo de la respuesta tridimensional no lineal de estructuras de varios grados de libertad sino las características mismas del movimiento incidente, en especial donde los efectos de sitio son tan importantes.

#### 4.1 Variación de la energía en el plano horizontal

En las figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 se presenta para la estación SC y diferentes sismos, los espectros de respuesta correspondientes que nos permiten apreciar la diferencia en ordenadas que un mismo periodo presenta cuando se analizan diferentes direcciones.

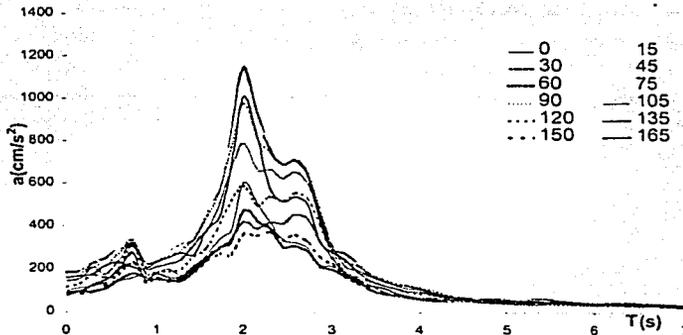


Figura 4.1 Espectros de aceleración rotados cada 15 grados en el plano horizontal para la estación SC y el sismo del 19 de septiembre de 1985

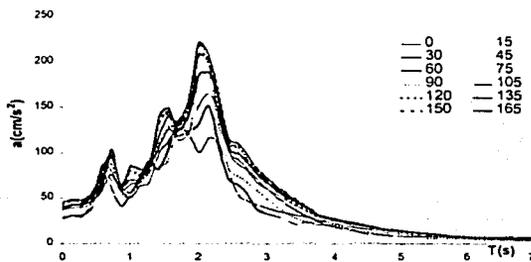


Figura 4.2 Espectros de aceleración rotados cada 15 grados en el plano horizontal para la estación SC y el sismo del 25 de abril de 1989

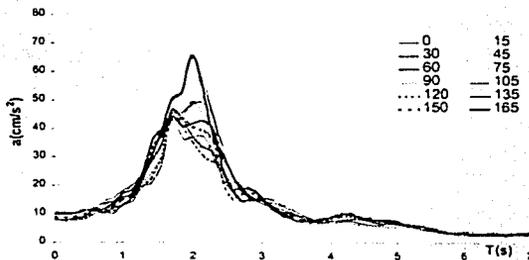


Figura 4.3 Espectros de aceleración rotados cada 15 grados en el plano horizontal para la estación SC y el sismo del 9 de octubre de 1995

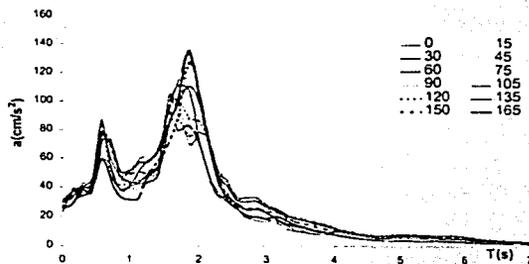


Figura 4.4 Espectros de aceleración rotados cada 15 grados en el plano horizontal para la estación SC y el sismo del 15 de junio de 1999

Como se puede apreciar en los espectros anteriores (figuras 4.1 a 4.4) la mayor diferencia entre respuestas se encuentra en el periodo dominante del suelo, que para la estación SC corresponde a 2 s. Es evidente que el comportamiento mostrado por la energía varía dentro del plano horizontal para un mismo evento al igual que para los diferentes eventos analizados sin mostrar tendencias de la dirección preferencial entre estos. Esto es un problema de especial importancia ya que para ciertos periodos estructurales se experimentan grandes cambios de la energía dentro del plano horizontal que afectarían igualmente en una forma muy variada para las diferentes direcciones a las estructuras allí ubicadas.

En la figura 4.5, se aprecia con mayor detalle la diferencia en amplificación para direcciones ortogonales de los espectros de aceleración de la estación SC para el sismo del 19 de septiembre de 1985 analizadas cada 15 grados dentro del plano horizontal. Se ve como para ordenadas espectrales de direcciones ortogonales en un mismo periodo, se presentan diferencias de hasta 3 veces como es el caso de la dirección N060E y N150E (figura 4.5e).

#### 4.2 Composición ortogonal de la energía

Hay que tener en cuenta que la aceleración mostrada en los espectros de respuesta para un mismo periodo no corresponden a un mismo instante en el tiempo para los diferentes espectros rotados, es decir, para el caso del 19 de septiembre de 1985 la diferencia apreciada entre los espectros rotados 60 y 150 grados en  $T=2$  s que corresponde a 4 veces en la estación SC (figura 4.5e), puede ser diferente, puesto que estos valores son espectrales y no necesariamente ocurren en un mismo instante de tiempo. Para ser realistas y encontrar las diferencias de aceleración que se presentan en un mismo instante de tiempo para dos direcciones diferentes y un determinado periodo en una misma estación, tendríamos que analizar las historias de aceleración de la estructura en parejas en el tiempo, esto corresponde al análisis de las historias de aceleración de un oscilador simple.

Analicemos ahora lo que realmente ocurre en el tiempo para este caso del 19 de septiembre de 1985 en las direcciones ortogonales N060E y N150E en la estación SC (figura 4.5e). Mediante la rotación de los registros de aceleración N-S y E-W un ángulo de 60 grados se obtienen los registros rotados N060E y N150E. Si queremos conocer cuándo en la dirección N060E se presenta la máxima aceleración, cuantas veces ésta se presenta en el mismo instante de tiempo en su dirección ortogonal (N150E), debemos analizar las historias de aceleración de ambos componentes rotados y buscar el máximo en el componente N060E y el valor de aceleración para el mismo instante de tiempo presentado en el componente N150E, así al dividir ambos valores encontrados por el máximo de la dirección N060E, obtenemos cuantas veces se presenta esta aceleración en su dirección ortogonal. Del análisis de las historias de aceleración para estos dos componentes rotados, efectivamente como se ilustra en la figura 4.5e se tienen como aceleraciones máximas  $1139.2 \text{ cm/s}^2$  para la dirección N060E y  $24.3 \text{ cm/s}^2$  para la dirección N150E, las cuales se presentan en diferentes instantes de tiempo. En la figura 4.6 se muestran para las dos direcciones analizadas (N060E y N150E) las correspondientes historias de aceleración para un periodo de 2 s graficadas como parejas

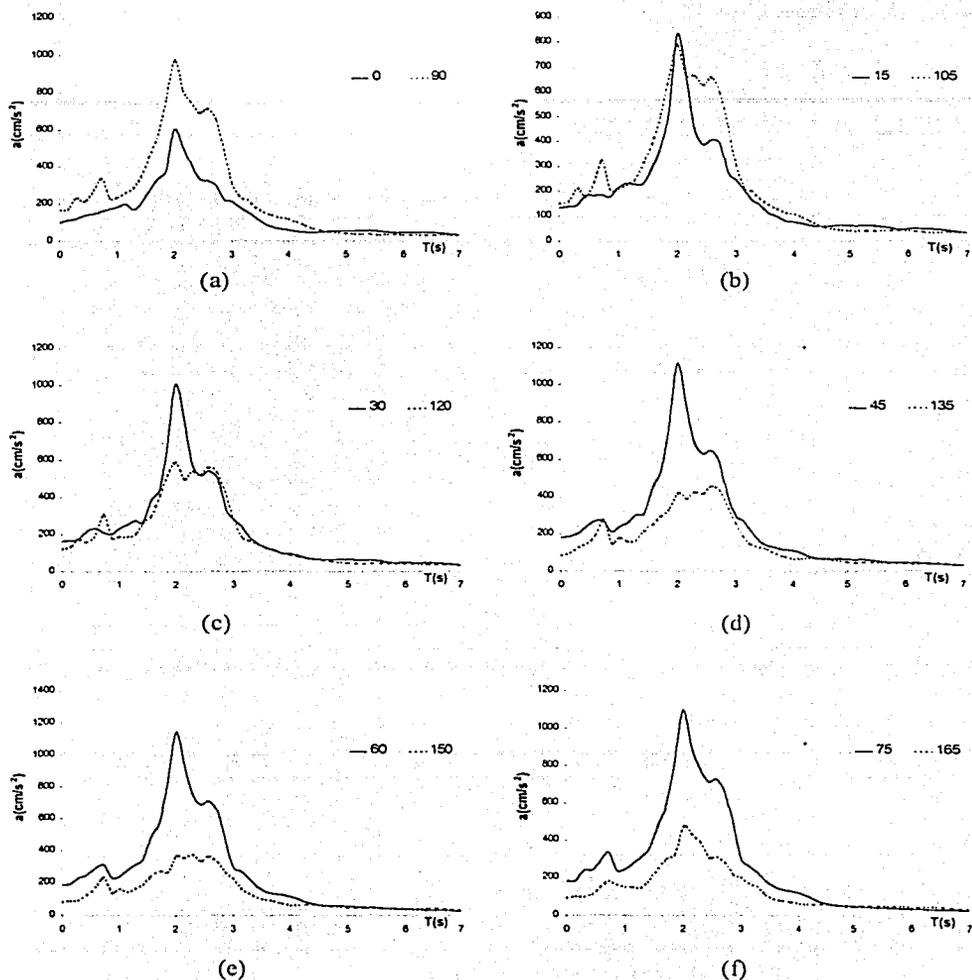


Figura 4.5 Espectros de aceleración rotados de la estación SC para el sismo del 19 de septiembre de 1985: (a) 0 y 90, (b) 15 y 105, (c) 30 y 120, (d) 45 y 135, (e) 60 y 150 y (f) 75 y 165 grados

en el tiempo. Ambas historias de aceleración han sido normalizadas respecto a la máxima aceleración presentada en la dirección N060E aplicándose valor absoluto en ambos componentes. En la figura 4.6 se aprecia que cuando se presenta la máxima aceleración en el componente N060E (1139.2  $\text{cm/s}^2$ ) para el mismo instante de tiempo en el componente N150E se presenta (24.3  $\text{cm/s}^2$ ) 0.021 veces el máximo de N060E. De la figura 4.6 es claro que el componente N150E presenta valores mucho mayores a 24.3  $\text{cm/s}^2$  pero en tiempos diferentes que el máximo del componente N060E.

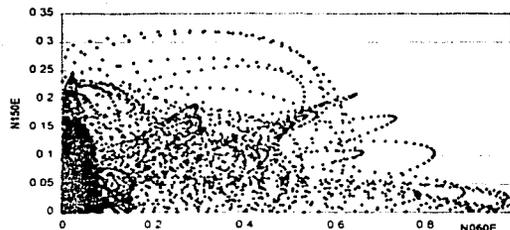


Figura 4.6 Factores de amplificación ortogonal de aceleración correspondientes en el tiempo presentados por SC en la dirección (N060E) para el 19/09/85

Ahora para el mismo sismo del 19 de septiembre de 1985, veamos el comportamiento en el tiempo de las componentes de aceleración de la estación SC en las direcciones N015E y N105E que son las componentes ortogonales donde los espectros de respuesta para esta estación presentan una menor diferencia para un periodo de 2 segundos (figura 4.5b). En este caso se aprecia de los espectros de respuesta de estos dos componentes que la aceleración presentada en el componente N105E corresponde a 0.95 veces la registrada en el componente N015E. Al efectuar un análisis de las historias de aceleración para un periodo de 2 segundos igual al que se acabo de efectuar para las dos direcciones anteriores, se obtiene la siguiente gráfica (figura 4.7). Esta figura presenta solo la envolvente de la nube de puntos que forman las parejas en el tiempo, de las dos componentes de aceleración analizadas.

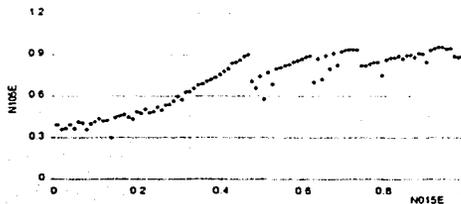


Figura 4.7 Factores de amplificación ortogonal de aceleración correspondientes en el tiempo presentados por SC en la dirección (N015E) para el 19/09/85

Podemos apreciar en la figura 4.7 que cuando en la dirección N015E se presenta el 100% de la aceleración, su correspondiente dirección ortogonal presenta 0.93 veces ese valor.

Veamos ahora lo obtenido bajo la acción de otros sismos para esta misma estación SC en las direcciones que corresponden a la menor diferencia entre espectros de respuesta para el mismo periodo de 2 s. Para el sismo del 25 de abril de 1989 estas direcciones corresponden a N000E y N090E y para el sismo del 15 de julio de 1999 las direcciones son N030E y N120E para la dirección de análisis y la ortogonal respectivamente (figura 4.8).

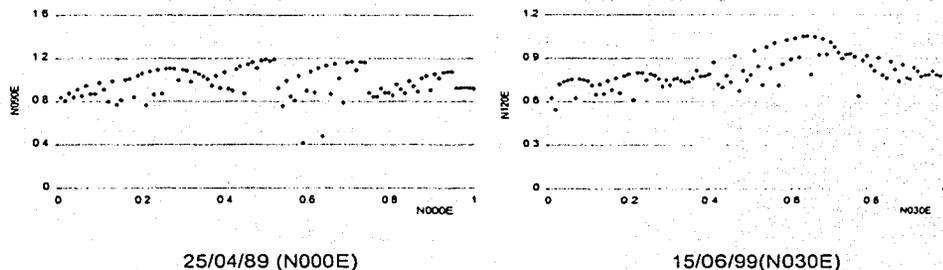


Figura 4.8 Factores de amplificación ortogonal de aceleración correspondientes en el tiempo presentados por SC

En el caso del 25 de abril de 1989, se puede apreciar que cuando se presenta el 100% de la aceleración en la dirección N000E, se tiene en su correspondiente dirección ortogonal aproximadamente 0.92 veces dicha aceleración, mientras que para el sismo del 15 de julio de 1999 para el 100% de la aceleración máxima en la dirección de análisis (N030E), se tiene para su dirección ortogonal 0.78 veces esta aceleración máxima.

Para otros sismos lo que sucede en la dirección ya analizada para el 19 de septiembre de 1985 (N015E y N105E) (figura 4.9), tenemos:

En el caso del 25 de abril de 1989 y el 14 de septiembre de 1995 la dirección ortogonal (eje Y) respecto a la de análisis (eje X) presenta mayores valores de aceleración que la máxima presentada en la dirección de análisis. Por el contrario, para el 9 de octubre de 1995 y el 15 de junio de 1999 se puede apreciar que para un 100% de la aceleración en la dirección de análisis se está presentando al mismo tiempo una aceleración de alrededor de 0.6 y 0.42 veces la aceleración respectivamente presentada en la correspondiente dirección de análisis. En estos dos últimos casos, los valores de aceleración presentados en las respectivas direcciones ortogonales son menores al máximo de cada una de las direcciones de análisis.

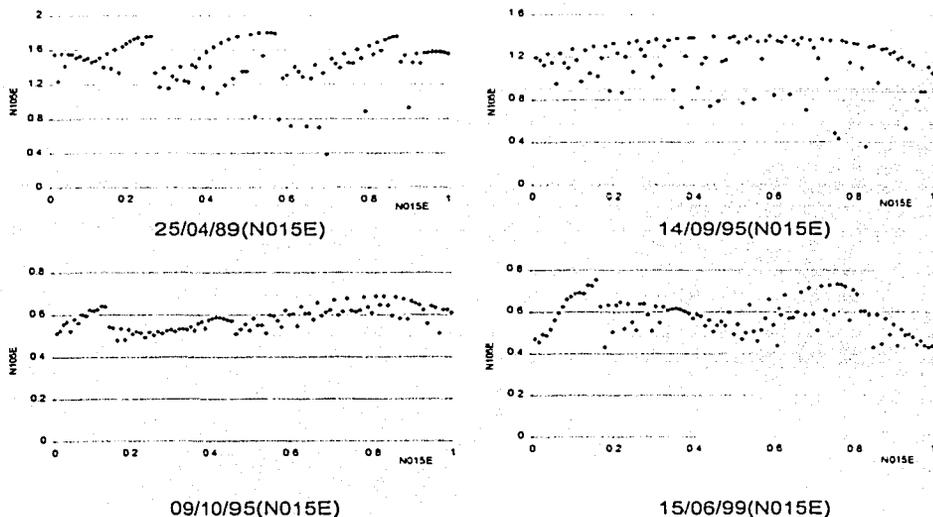


Figura 4.9 Factores de amplificación ortogonal de aceleración correspondientes en el tiempo presentados en la dirección N015E para la estación SC y varios sismos

Este comportamiento ilustrado en las figuras anteriores (figuras 4.6 a 4.9) nos muestra como para un 100% de la aceleración en la dirección de análisis, no necesariamente se presenta el un porcentaje constante de esta aceleración en su dirección ortogonal para el mismo instante de tiempo.

Mediante el estudio de la variación ortogonal de la energía sísmica podríamos obtener la suficiente información para elaborar espectros que nos muestren la proporción real máxima en el tiempo de la energía incidente en dirección ortogonal para diversas direcciones, optimizando así el análisis sísmico zonificado.

A continuación se presenta para las estaciones CS y CD en suelo blando y la estación CU en suelo firme el resultado de aplicar el procedimiento hasta acá descrito para direcciones de incidencia que van desde 0 hasta 360 grados partiendo de la dirección N-S dentro del plano horizontal y periodos estructurales hasta 7 segundos. Los resultados contenidos en las siguientes figuras son los correspondientes al factor de amplificación ortogonal (F.A.O.) que corresponde para un valor máximo de aceleración presentada en cada dirección de análisis. Para cada estación y sismo analizados se presentan los F.A.O. en forma tridimensional para ilustrar de manera clara su variación y en curvas de nivel, que nos muestra precisamente para varios rangos el factor de amplificación ortogonal de las diferentes combinaciones de dirección de análisis y periodo estructural.

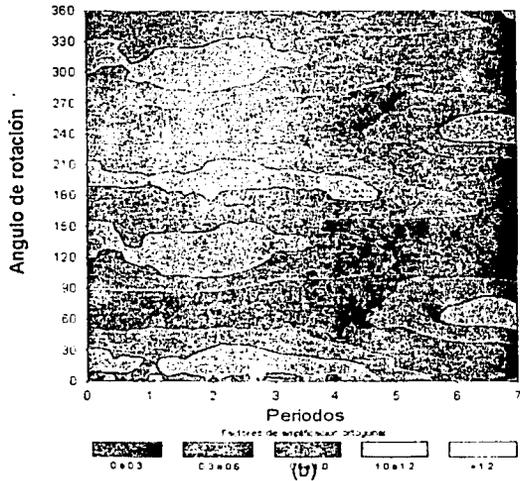
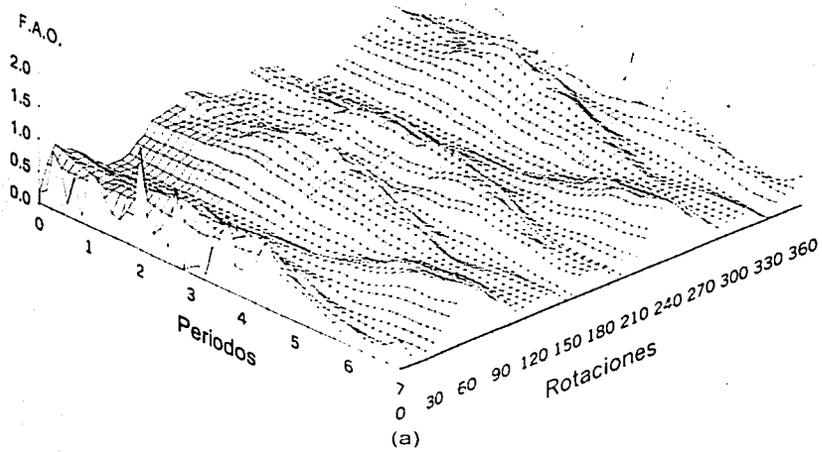


Figura 4.10 Factores de amplificación ortogonal para aceleración de la estación SC para el sismo del 19 de septiembre de 1985. (a) Figura 3D (b) curvas de nivel

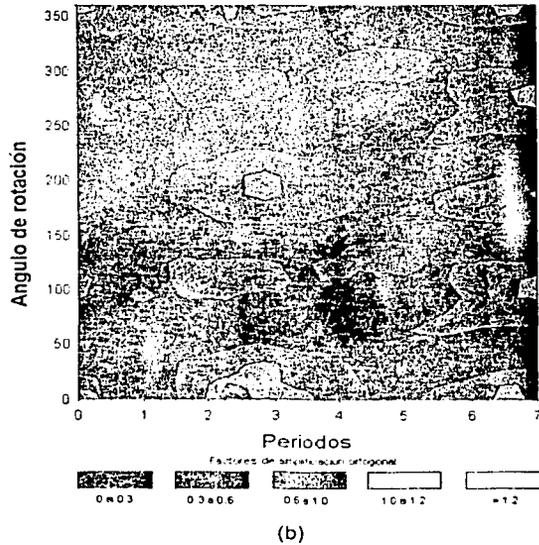
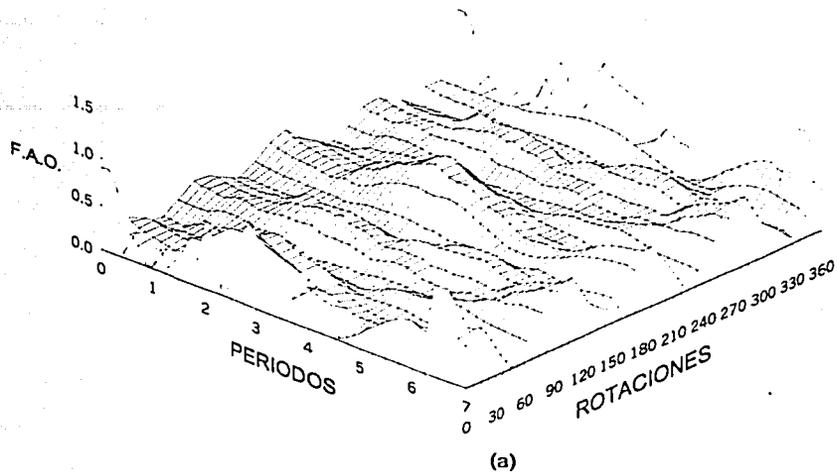
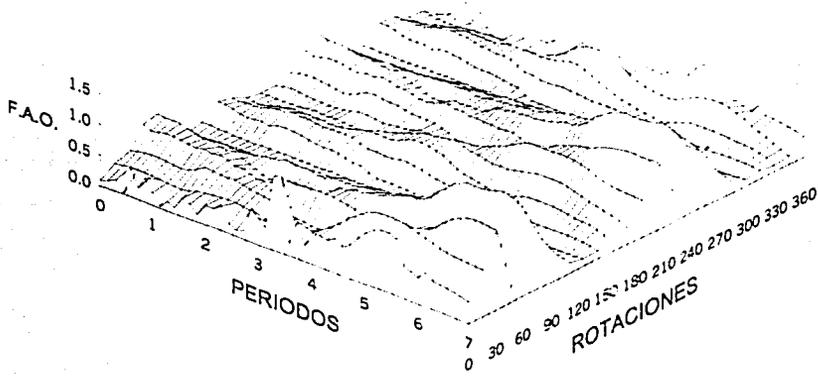
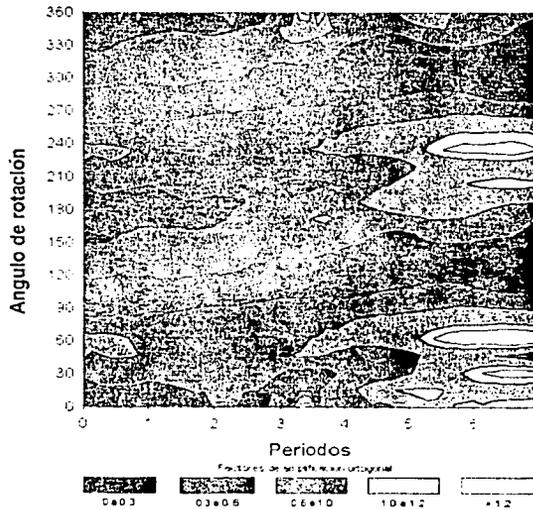


Figura 4.11 Factores de amplificación ortogonal para aceleración de la estación SC para el sismo del 14 de septiembre de 1995. (a) Figura 3D (b) curvas de nivel



(a)



(b)

Figura 4.12 Factores de amplificación ortogonal para aceleración de la estación SC para el sismo del 15 de junio de 1999. (a) Figura 3D (b) curvas de nivel

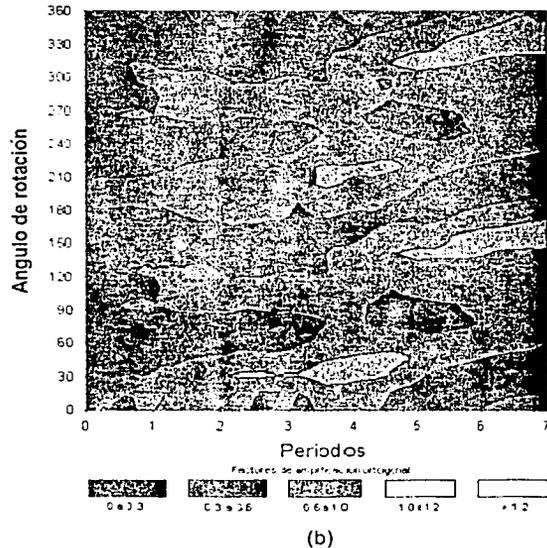
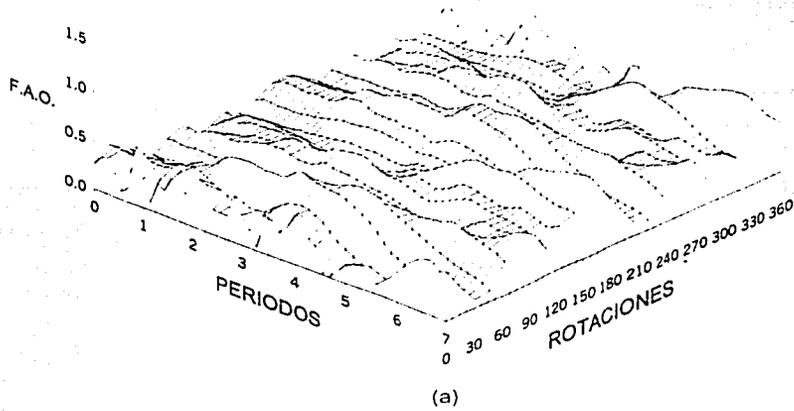


Figura 4.13 Factores de amplificación ortogonal para aceleración de la estación CD para el sismo del 19 de septiembre de 1985. (a) Figura 3D (b) curvas de nivel

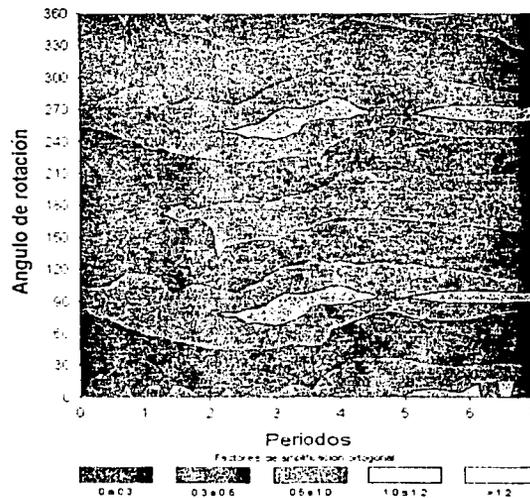
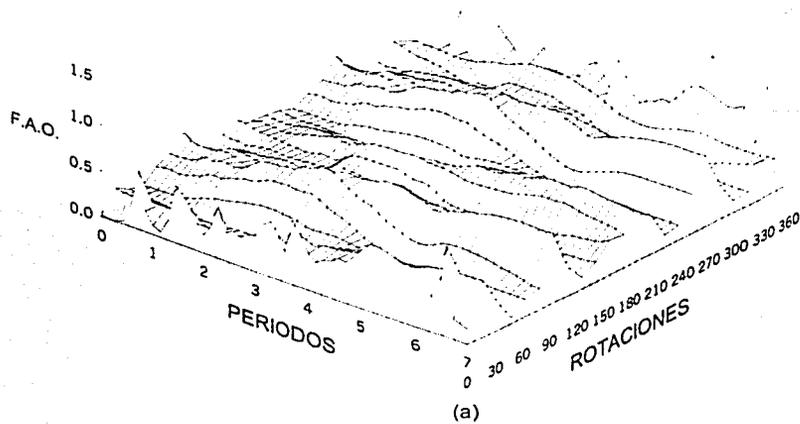


Figura 4.14 Factores de amplificación ortogonal para aceleración de la estación CD para el sismo del 14 de septiembre de 1995. (a) Figura 3D (b) curvas de nivel

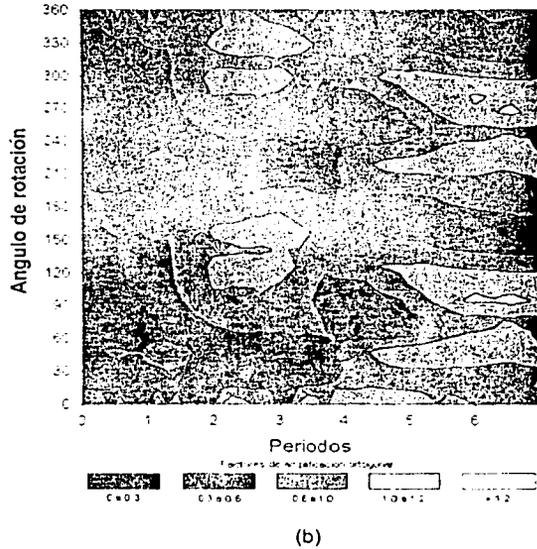
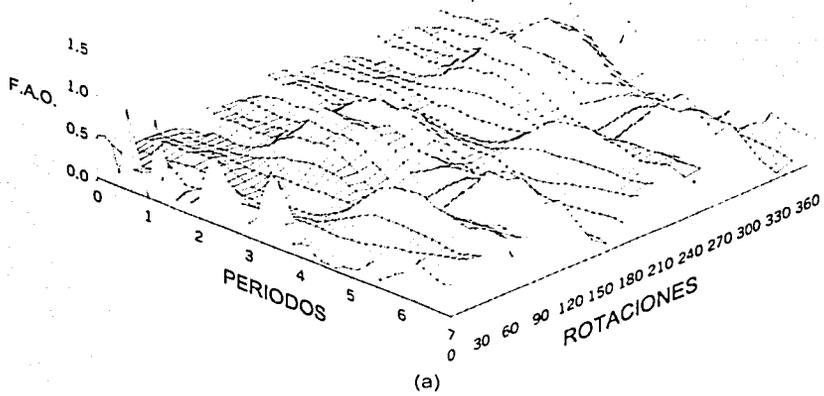
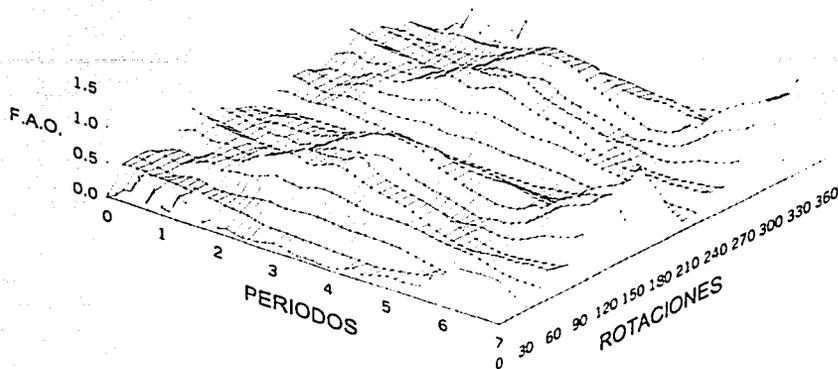
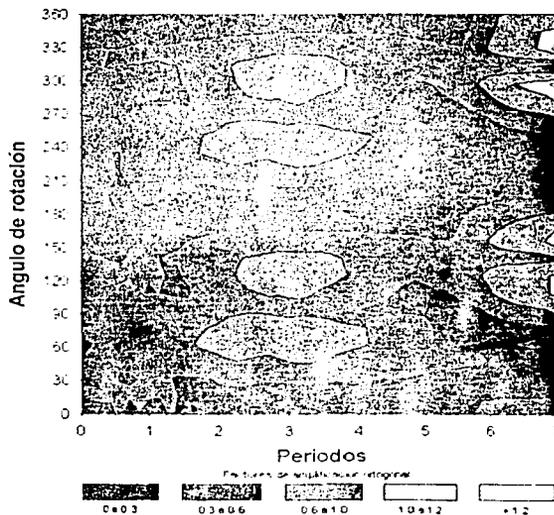


Figura 4.15 Factores de amplificación ortogonal para aceleración de la estación CU para el sismo del 19 de septiembre de 1985. (a) Figura 3D (b) curvas de nivel



(a)



(b)

Figura 4.16 Factores de amplificación ortogonal para aceleración de la estación CU para el sismo del 14 de septiembre de 1995. (a) Figura 3D (b) curvas de nivel

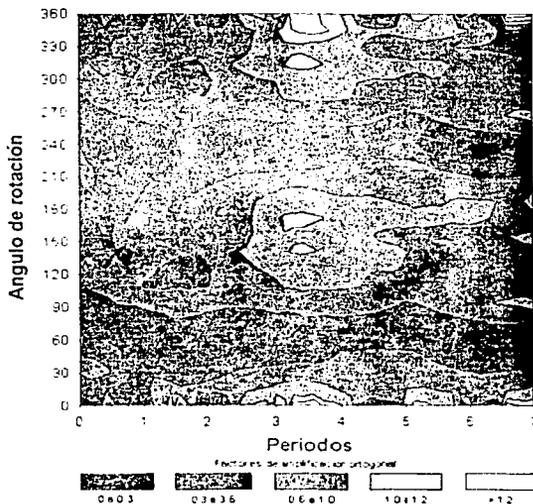
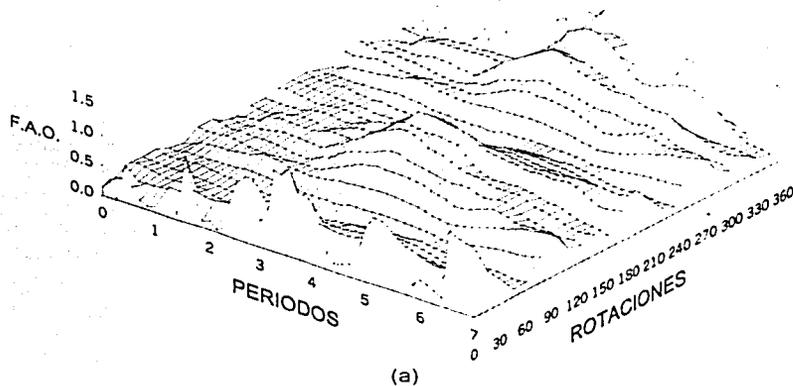


Figura 4.17 Factores de amplificación ortogonal para aceleración de la estación CU para el sismo del 15 de junio de 1999. (a) Figura 3D (b) curvas de nivel

De un detallado análisis del comportamiento del factor de amplificación ortogonal de la energía visto para el Valle de México en las figuras anteriores (figuras 4.10 a 4.17), se obtiene lo siguiente:

#### Tipo de falla

Al parecer el tipo de falla presenta influencia sobre el comportamiento de la energía ortogonal a la dirección de análisis (FAO) ya que para sismos de subducción se aprecian valores altos de éste alrededor del periodo del suelo, caso que no se repite para falla normal; esto se aprecia las dos estaciones de suelo blando analizadas.

#### Magnitud

Es evidente al comparar los valores de FAO ante los dos sismos de subducción que tanto en suelo blando como suelo firme cuanto mayor es la magnitud, mayor es el valor del factor de amplificación ortogonal. Estos valores crecen con la magnitud alrededor de las mismas zonas del plano Angulo de rotación – Periodo.

#### Distancia epicentral

Aunque el sismo de falla normal analizado presenta la menor magnitud, parece ser que la distancia epicentral afecta los valores del factor de amplificación ortogonal ya que en este caso es donde se presentan sus máximas amplificaciones.

#### Periodos mas afectados

Se aprecia que para los tres sismos estudiados se presentan altos valores de FAO en periodos grandes. En suelo blando para sismos de subducción los mayores valores de FAO se ubican en periodos alrededor del periodo del suelo, mientras que para zona firme se tiene concentración de altas amplificaciones alrededor de 3 segundos para los tres sismos analizados. Para falla normal en suelo blando alrededor del periodo del suelo no se aprecian valores de FAO superiores a 0.6.

#### Dirección preferencial del FAO

En suelo firme para un periodo alrededor de 3 segundos se tiene una dirección preferencial de altos valores de FAO cercana a 150 grados. Para suelo blando en la estación SC tenemos que en periodos cercanos al periodo del suelo se presenta mayor amplificación de FAO alrededor de 30 grados mientras que para periodos grandes esta amplificación se presenta cerca de 60 grados. En la estación CD no se aprecia tendencia en la dirección preferencial de los valores altos de FAO.

Se aprecia de las curvas de nivel (figuras 4.10 a 4.17) para todos los casos analizados que las combinaciones de dirección de análisis y periodo estructural que presentan un factor de amplificación ortogonal inferior al 30 % es del orden de la mitad de todas las posibles combinaciones.

En general se observa que se presentan valores altos de FAO para periodos grandes en terreno blando y terreno firme lo cual puede deberse a efectos regionales del Valle mientras que para suelo blando adicionalmente se presentan amplificaciones de FAO en cercanías al periodo del suelo, lo que nos muestre la influencia de los efectos de sitio.

---

---

## CONCLUSIONES

Para el Valle de México, tanto en suelo firme como en suelo blando el terreno presenta una dirección preferencial del movimiento en la etapa de arribo de las ondas P igual a la dirección de incidencia de las ondas sísmicas.

Se pudo apreciar de los resultados obtenidos para los sismos estudiados que tanto para suelo firme como para suelo blando, el suelo presenta un comportamiento no uniforme en el plano horizontal, apreciándose la mayor diferencia en periodos muy cercanos al periodo representativo del sitio de la estación. Esta diferencia en el comportamiento cerca al periodo del suelo esta directamente relacionada para un sitio con la magnitud del evento.

Del estudio de la dirección de la máxima aceleración para varias estaciones dentro del Valle de México mediante espectros de aceleración y cocientes de Fourier, se pudo apreciar que los efectos de sitio para las distintas estaciones de suelo blando estudiadas no presentan una tendencia definida al analizarlas en conjunto, pero al revisar para ellas el efecto combinado de lo registrado en roca más los efectos de sitio, éstas estaciones muestran que su comportamiento puede estar siendo dominado por ondas generadas en las discontinuidades presentadas por el cambio de zona blanda a zona firme del Valle.

Analizando detalladamente todos los espectros de respuesta del Valle de México estudiados, vemos que respecto al comportamiento de la energía presentada alrededor de un periodo de 3 s, se puede pensar que para estaciones de suelo firme, la dirección preferencial de ésta varía en función a la dirección de incidencia de las ondas sísmicas ya que para cada sismo analizado esta dirección correspondía o estaba muy cerca de la dirección de incidencia de las ondas al Valle. En cuanto al comportamiento de ésta energía en suelo blando, se puede ver como en este caso dominan los efectos de sitio, ya que para el caso de la estación SC, y los tres sismos estudiados la dirección preferencial de esta energía cercana a 3 s fue la misma.

Se aprecia lo adecuado que para el diseño sería el contemplar los efectos que cada uno de los diferentes sitios de suelo blando presentan ante la incidencia sísmica al tener en cuenta que cada uno de estos tiene una variación de la respuesta dentro del plano horizontal, mostrando una dirección preferencial de la energía que en algunos casos llega a ser del orden tres veces comparada con la presentada en su dirección ortogonal. Al hacer un estudio más detallado teniendo en cuenta una colección más amplia de sismos se puede tener para cada estación el rango de direcciones en las que se presenta la máxima respuesta del suelo pudiendo brindar a las estructuras la resistencia adecuada en la dirección que más lo requiere.

Del análisis del comportamiento del factor de amplificación ortogonal de la energía visto para el Valle de México en las estaciones SC, CD y CU se pudo apreciar que este se encuentra en función del tipo de falla, Magnitud del evento sísmico y de la distancia epicentral. También se observó que para todo el Valle de México se presenta mayor amplificación en ciertas direcciones para periodos altos mientras que para suelo blando además de periodos altos presenta factores de amplificación ortogonal grandes en periodos cercanos al periodo del sitio; mientras que en suelo firme se observa un valor alto de este factor en ciertas direcciones para un periodo cercano a 3 segundos.

---

## REFERENCIAS

F.J. Chavez García (1995). Dispersión de ondas superficiales en el Valle de México y su influencia en la respuesta sísmica de la zona de lago en septiembre de 1985. La sismología en México 10 años después del temblor de Michoacán del 19 de septiembre de 1985 (M=8.1) Monografía No. 2 Unión Geofísica Mexicana. pp 143-156

J.M. Espinosa Aranda (1995). Instrumentación y registro sísmico en el Valle de México, a 10 años del sismo del 19 de septiembre de 1985. Simposio Internacional 18 y 19 de septiembre de 1995.

Joyner, W.B. y Boore, D.M. (1998). "Measurement, characterization and prediction of strong ground motion" Proceedings of earthquake. Engineering and soil dynamics, II GT Div./ASCE, Park City, Utah Junio 27-30, pp. 43-101

Reinoso E. Estudios para microzonificación.

Reinoso E. (1991). Efectos sísmicos locales en el Valle de México: amplificación en zona lacustre. IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Manzanillo, México, 2, 224-236

Reinoso E. (1996). Algunos resultados recientes sobre el peligro sísmico en la Ciudad de México. Revista de Ingeniería Sísmica, 53, 1-24

Reinoso E. (1997). Características sísmicas de la Ciudad de México: Amplificación de las ondas sísmicas en el Valle de México, características del movimiento del terreno y microzonificación de la ciudad. Curso seguridad sísmica de las construcciones para Directores responsables de Obra. CENAPRED, pp 53-82

Reinoso E., Quiroga C.E. (2001). Movimiento bidimensional en zona de lago de la Ciudad de México y su efecto en las estructuras. XIII Congreso nacional de Ingeniería Sísmica, Guadalajara, Jalisco, México. Noviembre de 2001.

Rosenblueth E. , Sánchez-Sesma F.J., Ordaz M. Y Singh S.K. (1987). Espectros de diseño en el reglamento para las construcciones del distrito federal, VII Congreso nacional de Ingeniería Sísmica, Querétaro, México, A1-A17.

F.J. Sánchez Sesma, L.E. Pérez Rocha, J.L. Rodríguez Zúñiga y F. Flores Cruz (1995). Efectos de sitio en la Ciudad de México a 10 años de los sismos de 1985. La ingeniería Civil a 10 años de los sismos de 1985. Simposio Internacional 18 y 19 de septiembre de 1995.

Shri K. Singh y Mario Ordaz (1994). Sismicidad y movimientos fuertes en México: una visión actual. La ingeniería Civil a 10 años de los sismos de 1985. Simposio Internacional 18 y 19 de septiembre de 1995.

S.K. Singh, M. Ordaz, J.F. Pacheco, R. Quass, L. Alcántara, S. Alcocer, C. Gutiérrez, R. Meli, and E. Ovando (1999). A preliminary report on the Tehuacán, México earthquake of June 15, 1999 (Mw=7.0). Seismological Research Letters, Volume 70, number 5 September/October 1999.