



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

ESPECTROS DE RESPUESTA ESTIMADOS PARA LA CIUDAD DE OAXACA

T E S I S

QUE PARA OBTENER AL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

RICARDO DURÁN HERNÁNDEZ

TUTOR:

M.I. LEONARDO ALCÁNTARA NOLASCO

INTRODUCCIÓN	1
I. RED ACELEROGRÁFICA EN LA CIUDAD DE OAXACA	9
I.1 Localización de las estaciones	12
I.2 Equipo de registro sísmico	22
I.3 Registros obtenidos	25
II. DETERMINACIÓN DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EMPÍRICAS	27
II.1 Selección de registros	28
II.2 Cálculo de funciones de transferencia	29
II.3 Funciones de transferencia promedio	36
III. ESTIMACIÓN DE ESPECTROS DE RESPUESTA	41
III.1 Teoría de vibraciones aleatorias (TVA)	51
III.2 Cálculo de espectros de respuesta	55
III.3 Análisis de resultados	62
IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	65
REFERENCIAS	67
APÉNDICES	71

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

La ciencia que estudia los aspectos relacionados con la ocurrencia de temblores de tierra, terremotos o sismos se denomina **Sismología**. Esta es una ciencia joven, puesto que gran parte de sus métodos e instrumentos de observación fueron desarrollados a lo largo del siglo XX. A pesar de esto, la Sismología ha logrado avances notables, quizá una de sus más valiosas contribuciones al entendimiento de nuestro planeta lo constituya su aportación a la llamada **Tectónica de Placas**. La estructura interna de la Tierra, de acuerdo a la figura 1 está constituida por a) el núcleo, el cual está compuesto en gran parte por elementos metálicos como el hierro y el níquel, b) el manto, cuya composición es a base de silicatos abundantes en potasio, sodio y calcio, c) el cascarón más externo está integrado por la corteza y parte del manto, tiene un espesor aproximado de 100 Km y parece comportarse como un cuerpo rígido "flotando" en el resto del manto, si se considera un tiempo geológico, los movimientos del cascaron semejarían a los de un fluido.

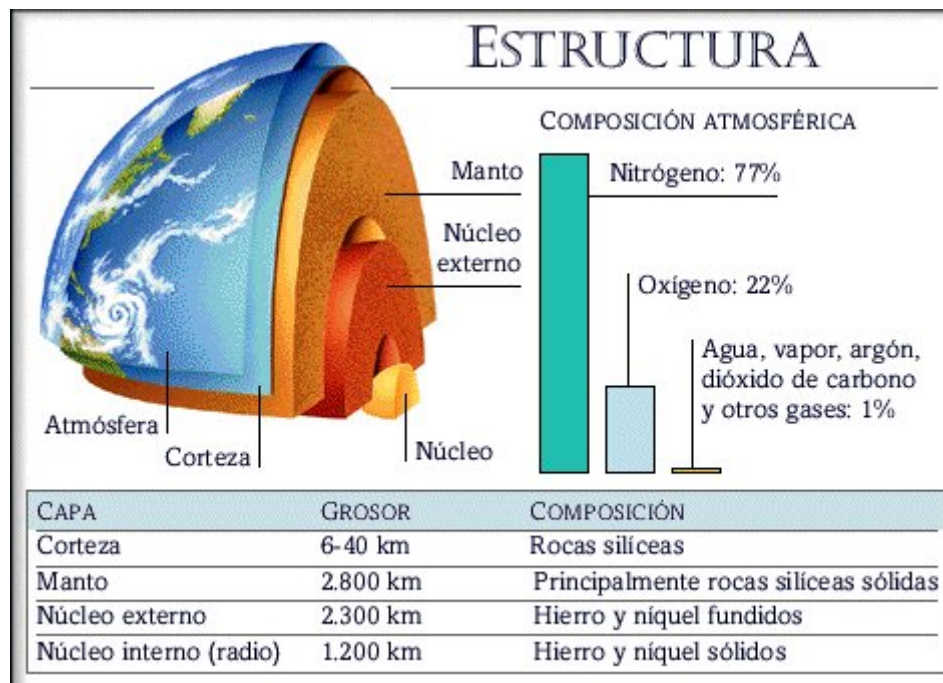


Figura1. Estructura interna de la tierra (ref. 1)

El cascarón exterior llamado litosfera no es continuo sobre la superficie de la Tierra, sino que está formado por diferentes "placas", que hacen contacto unas con otras, como los gajos de una pelota de fútbol. Las placas sufren movimientos relativos, debidos a fuerzas de origen aún no completamente conocidas y aplicadas a lo largo de las mismas. Como la superficie del planeta está cubierta por dichas placas, el movimiento relativo entre ellas solo se logra si en algunos de los márgenes de las mismas se está creando nueva litosfera mientras que en otros márgenes algunas de ellas "cabalgan" o se enciman sobre otras; un proceso al que se conoce actualmente como *subducción* (figura 2).

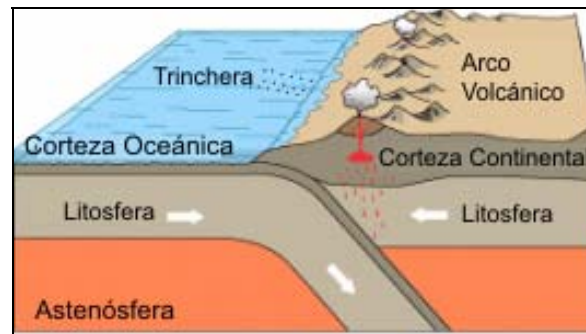


Figura 2. Proceso de subducción (ref. 2)

No se sabe con certeza qué causa los esfuerzos que producen los movimientos de las placas, pero se cree que éstos son producidos por transferencia convectiva de calor. Un ejemplo de este proceso, ocurre cuando se hierve agua o cualquier otro líquido, en donde el fluido más cercano a la fuente de calor se expande, se vuelve menos denso y tiende, por lo tanto, a subir a la superficie donde se enfría y es desplazado hacia el fondo por las nuevas parcelas ascendentes. De esta manera se establece un proceso continuo de ascenso y descenso del líquido en celdas permanentes formadas por las corrientes del fluido.

¿Cuál es la relación de este fenómeno con los temblores? En primer lugar es importante notar que en una zona de subducción el movimiento de una placa bajo la otra se realiza venciendo las fuerzas de fricción, generadas en el contacto entre ambas.

A lo largo de este contacto, llamado zona de *Wadati-Benioff* (WB), el movimiento de una placa contra la otra tiene lugar discontinuamente, por "brincos". Es esto precisamente lo que genera los temblores en esas regiones.

Aunque este proceso puede parecer intuitivamente obvio, en realidad no lo es; durante mucho tiempo, se pensó que el fallamiento de la corteza era un efecto de los temblores y no el origen de los mismos. Como fuentes de éstos, se pensaba en intrusiones de magma o colapso de volúmenes por cambios de densidad de las rocas que componen la corteza. Aunque estos mecanismos pueden ciertamente ocurrir, en la actualidad sabemos que la mayoría de los temblores en las regiones de subducción, se originan por el mecanismo expuesto y son llamados "tectónicos". Otros tipos de sismos están asociados a fenómenos locales, como la actividad volcánica o el colapso del subsuelo por la extracción de fluidos o materiales del subsuelo.

Tipos de falla. En geología una falla es una discontinuidad que se forma en las rocas someras de la Tierra (hasta 200 km de profundidad) por fracturamiento, cuando concentraciones de fuerzas tectónicas exceden la resistencia de las mismas, el movimiento generado puede causar terremotos. El tipo de movimiento a lo largo de una falla depende del tipo de ruptura. A continuación se describen los principales tipos de fallas.

Dependiendo de los esfuerzos que actúen sobre un cuerpo, éste puede fallar en alguna de las tres formas siguientes. La primera, mostrada en la figura 3 (a), es de tipo normal o de deslizamiento, que es resultado de la tensión generada entre las dos superficies de contacto. La figura 3 (b) muestra el segundo caso, que es de forma inversa o de cabalgadura, este ocurre cuando existe compresión. El tercer tipo, mostrado en la figura 3 (c), es el transcurrente o de rumbo, que se produce cuando existe cortante sin componente vertical, en este caso el corrimiento es horizontal. Cuando los esfuerzos que actúan sobre el terreno son una combinación de tensión o compresión y cortante, el terreno se puede fracturar en una forma mixta, como se muestra en la figura 3 (d).

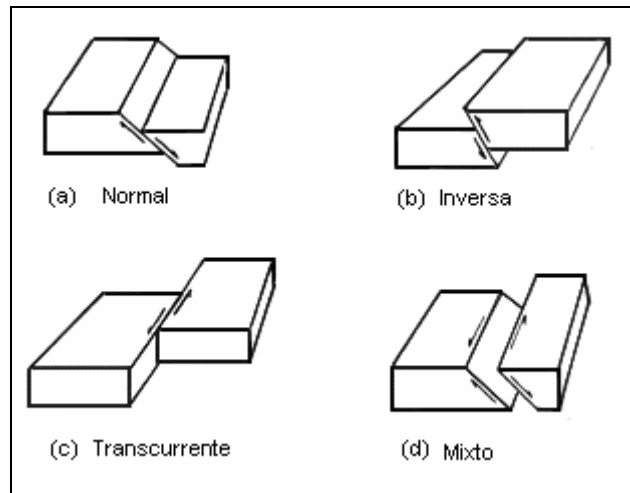


Figura 3. Tipos de falla (ref. 3)

Ubicación tectónica de México. El territorio mexicano se encuentra sobre cinco placas tectónicas, sin embargo la mayor parte se ubica sobre la Norteamericana, esta contiene también a toda Norteamérica, partes del océano Atlántico y Asia. La península de Baja California, así como California y el océano Pacífico están sobre la placa del Pacífico. El sur de Chiapas, las islas Caribeñas y los países de Centroamérica se hallan en la del Caribe. Las otras dos placas que conforman el rompecabezas tectónico de México son las de Cocos y Rivera. En la figura 4 se muestra su ubicación y se indica la dirección de su movimiento.

Existen dos regiones sísmicas que abarcan importantes zonas del país, la primera se ubica en el extremo norte del Golfo de California, donde la placa del pacífico se mueve horizontalmente hacia el noreste respecto a la Norteamericana llevando consigo a la península de Baja California. Su velocidad relativa de deslizamiento es aproximadamente de cinco centímetros por año. La segunda de estas regiones es la zona de subducción de la costa del Pacífico y es directamente responsable de casi toda la actividad sísmica en el centro del país. Está localizada en una franja de más o menos 200 km de ancho y 1500 km de largo que va desde Colima hasta Chiapas. Esta zona es la que ha producido los sismos de mayor magnitud, que han afectado a un alto porcentaje de la población del país.

En algunas partes de la costa mexicana, como ciertas zonas de Oaxaca y Guerrero, por ejemplo, los grandes sismos parecen repetirse aproximadamente cada 35 ó 40 años; éste parece ser el lapso necesario para acumular suficiente energía capaz de generar un gran sismo.

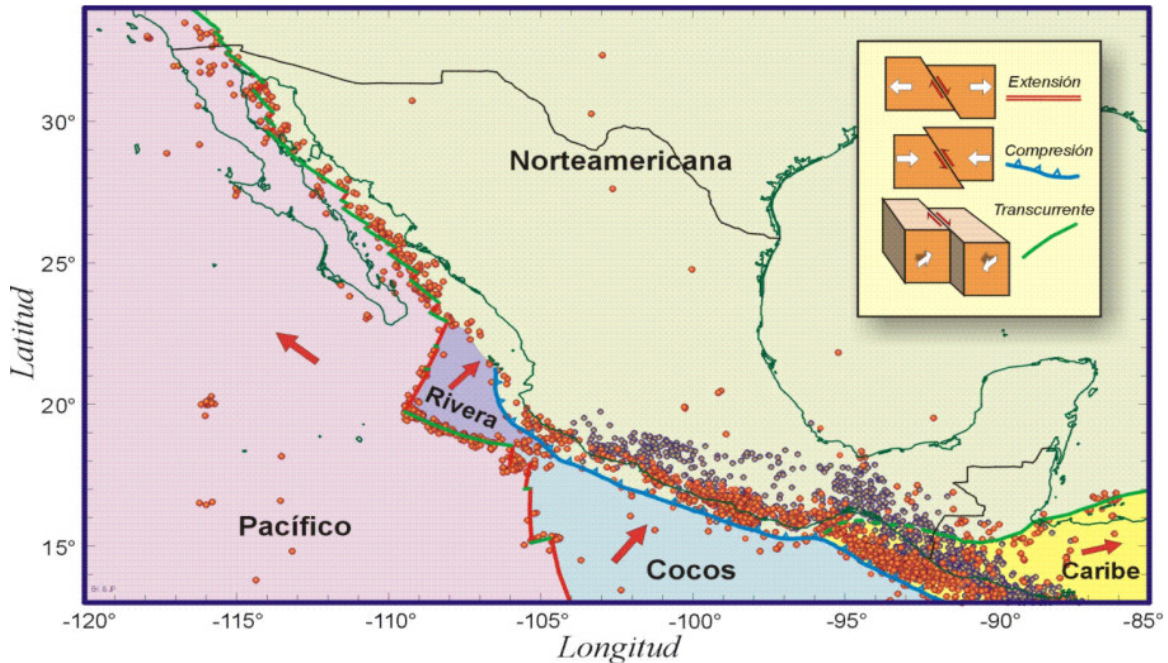


Figura 4. Ubicación y movimiento de las placas en la República Mexicana (ref. 4)

Al introducirse por debajo de la costa sur de México, la placa de Cocos se rompe y deforma produciendo eventos sísmicos profundos (80 a 100 km de profundidad) que reflejan los esfuerzos generados por la subducción. Si bien los sismos en el interior de la placa son menos frecuentes y de magnitudes generalmente menores que los temblores de subducción, aquéllos ocurren hacia el interior del país, donde se encuentran los mayores centros de población. Su ocurrencia cercana a concentraciones urbanas produce daños relativamente altos, tal es el caso de los eventos de Orizaba, Veracruz en 1973 y de Huajuapán de León, Oaxaca en 1980. La actividad sísmica más frecuente y de mayor magnitud tiene lugar en las fronteras de placa donde éstas se mueven en direcciones contrarias a las otras, como ocurre a lo largo de la costa del Pacífico.

Como resultado de este movimiento relativo en direcciones contrarias y al comportarse las placas casi como cuerpos rígidos, se presenta un deslizamiento de una por debajo de la otra (figura 5).

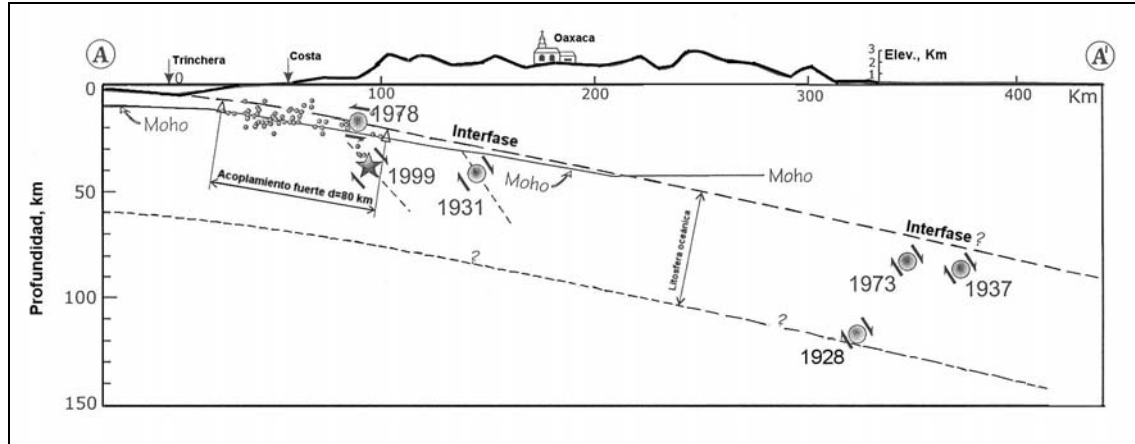


Figura 5. Perfil representativo de la zona de subducción a la altura de Oaxaca (ref. 5)

De la figura anterior se observa que los puntos negros representan réplicas del sismo de Oaxaca de 1978 y definen la falla que se forma en la zona de contacto entre las dos placas. Nótese la existencia de sismos más profundos en el interior de la placa de Cocos que penetra por debajo de México.

En el caso del estado de Oaxaca, los grandes sismos son causados por la subducción de las placas de Cocos y de Norteamérica. En esta región el ángulo de buzamiento de la placa de Cocos es aproximadamente de 15 grados, la velocidad relativa con respecto a la Norteamericana es de 6.4 cm/año y su zona de contacto se encuentra a 16 Km de profundidad en una franja de 80 km, dicha profundidad se alcanza casi a 300 Km dentro del continente a partir de la costa, con lo anterior se puede afirmar que la placa de Cocos se sumerge casi horizontalmente en la región de Oaxaca y mantiene su geometría, por lo que no se puede descartar la posibilidad de sismos de gran magnitud en esta zona (ref. 6) .

Sin embargo en esta zona del país también se presentan sismos que no están ligados directamente a movimientos relativos en las fronteras de las placas sino a fallas de tipo normal o inversa. Los eventos de esta naturaleza son altamente peligrosos en la región epicentral por su poca profundidad (10 a 15 km).

Por lo tanto existe un peligro sísmico importante por la gran actividad sísmica que se presenta en la zona de subducción, además de la ocurrencia de sismos continente adentro y al riesgo latente que significan las brechas sísmicas, por lo cual se instaló la Red Acelerográfica de la ciudad de Oaxaca (RACO). Considerando la cobertura que ha alcanzado dicha red y los estudios complementarios de los tipos de suelo con los que se cuenta, es posible estimar los espectros de respuesta, en los diferentes sitios donde se tiene instrumentado. Dados los resultados que se obtengan se podrán comparar con otros estudios para determinar los espectros de diseño de la ciudad de Oaxaca.

Objetivos

Estimación de Espectros de Respuesta de eventos sísmicos que no fueron registrados por la Red Acelerográfica de la ciudad de Oaxaca, utilizando la Teoría de Vibraciones Aleatorias.

Contenido

El primer capítulo describe la red Acelerográfica de la ciudad de Oaxaca, haciendo hincapié en la localización de las estaciones, el equipo de registro sísmico utilizado y los registros obtenidos. En el segundo capítulo se establecen las Funciones de Transferencia Empíricas que son la base para la estimación de los Espectros de Respuesta (ERE), para ello se llevó acabo previamente una selección de registros sísmicos. Posteriormente, mediante la aplicación de la Teoría de Vibraciones Aleatorias (TVA), en el tercer capítulo, se efectúa el cálculo de Espectros de Respuesta. Finalmente se incluyen las conclusiones así como algunas recomendaciones.

CAPÍTULO I

RED ACELEROGRÁFICA EN LA CIUDAD DE OAXACA

I. RED ACELEROGRÁFICA EN LA CIUDAD DE OAXACA

Desde fines del siglo XIX y a principios del siglo XX, se establecieron estaciones sísmicas con diferentes tipos de aparatos con el objetivo de registrar la actividad sísmica en el mundo. En México, la instrumentación para el registro de temblores se remonta a la última década del siglo XIX, posteriormente en 1910 se funda el Servicio Sismológico Nacional (SSN) y de esta manera para 1960 se hace posible aplicar los datos generados dentro del campo de la ingeniería sísmica. Los sismos ocurridos en nuestro país a partir de 1957 hicieron evidente la falta de instrumentos para registrar eventos de gran magnitud. Seguido de lo anterior, la instrumentación sísmica se incrementó dado al interés que este tipo de eventos despertó en el ámbito de la ingeniería civil.

Los sismos pueden registrarse de diversas maneras; para ello se han inventado aparatos que generan registros de los movimientos del suelo y se han propuesto escalas de intensidad para comparar sus efectos destructivos o escalas de magnitud para estimar su tamaño. Para llevar a cabo lo antes mencionado y estudiar los temblores se pueden usar distintos tipos de aparatos, que principalmente son los *sismógrafos* y *acelerógrafos* (ref. 7).

El sismógrafo es un aparato que registra la velocidad del movimiento del suelo causado por el paso de una onda sísmica. Estos fueron ideados a fines del siglo pasado, perfeccionados a principios del presente y actualmente han alcanzado un alto grado de desarrollo electrónico, pero el principio básico empleado no ha cambiado.

Para registrar el movimiento del suelo es necesario referirlo a un punto fijo en el espacio, debido a que si se refiriera a un punto anclado a este, no sería posible obtener un registro, puesto que el punto también se movería junto con el elemento al que está sujeto. Para salvar esta dificultad, se recurre al principio de inercia, ya que este menciona que todos los cuerpos tienen una resistencia al movimiento o a variar su velocidad. Así, el movimiento del suelo puede ser medido con respecto a la posición de una masa suspendida por un elemento que le permita permanecer en reposo por algunos instantes.

El mecanismo consiste usualmente en una masa suspendida de un resorte atado a un soporte acoplado al suelo, cuando el soporte se sacude al paso de las ondas sísmicas, la inercia de la masa hace que ésta permanezca un instante en el mismo sitio de reposo. Posteriormente cuando la masa sale del reposo, tiende a oscilar (figura I.1).

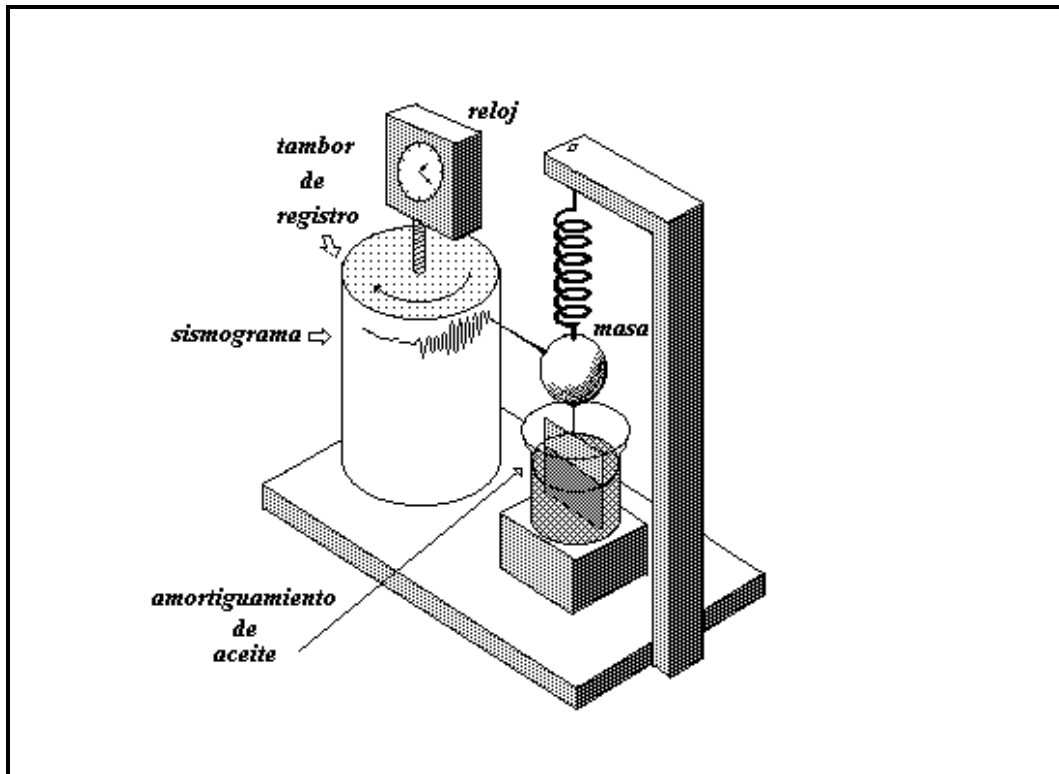


Figura I.1 Principio básico de operación y registro de un sismógrafo (ref. 8)

Sin embargo, ya que esta oscilación posterior del péndulo no refleja el verdadero movimiento del suelo, es necesario amortiguarla. Este era el método utilizado en los aparatos antiguos, actualmente se logra por medio de bobinas o imanes que ejercen las fuerzas amortiguadoras de la oscilación libre de la masa. El papel donde traza el movimiento se conoce como *sismograma*.

Al presente, los sismógrafos más avanzados son los llamados de banda ancha que hacen posible obtener un registro digital de los movimientos con un gran intervalo de frecuencias con la misma respuesta. Estos aparatos operan las 24 horas para captar cualquier movimiento que ocurra.

Por otro lado, los acelerógrafos, como su nombre lo indica, miden las aceleraciones del terreno durante temblores intensos, operan mediante el mismo principio que los sismógrafos, sin embargo presentan ciertas diferencias. Sus características dinámicas son tales que son más sensibles a los cambios de aceleración que a los cambios de desplazamiento del suelo, su amplificación es menor por lo que logran captar por completo un temblor fuerte y en general no operan las 24 horas del día, sino que tienen dispositivos especiales de arranque que los activan cuando el movimiento del terreno llega a una cierta intensidad, que puede calibrarse.

Hoy en día se cuenta con redes acelerográficas en las principales regiones sísmicas del país, teniendo una mayor concentración en la zona de subducción del Pacífico, en los estados de Oaxaca, Guerrero, Michoacán y Jalisco, así como en la parte norte de la península de Baja California en donde se monitorea la actividad de la falla de San Andrés. Un número importante de estas estaciones se ubican en las ciudades de Acapulco, México, Oaxaca y Puebla, y en trayectorias que van de la costa del Pacífico hacia los valles de Oaxaca y México (figura I.2).

I.1 Localización de las estaciones

Entre los años de 1910 y 1923 da inicio la instrumentación sísmica en el estado de Oaxaca (ref. 9), cuando el Servicio Sismológico Nacional (SSN) instala 9 estaciones sismológicas en el país, en las ciudades de: México, Chihuahua, Monterrey, Guadalajara, Veracruz, Mérida, Zacatecas y Oaxaca. Sin embargo es hasta el año de 1970 cuando el Instituto de Ingeniería de la UNAM (IdeI), instala una estación acelerográfica en la Facultad de Medicina de la Universidad de Oaxaca, con el objetivo de registrar movimientos fuertes que en ocasiones no podían ser captados íntegramente por los sismógrafos, seguido de esto, en 1979 se instala una estación en Puerto Escondido (PESC) dando inicio a la instrumentación en la franja costera de Oaxaca.

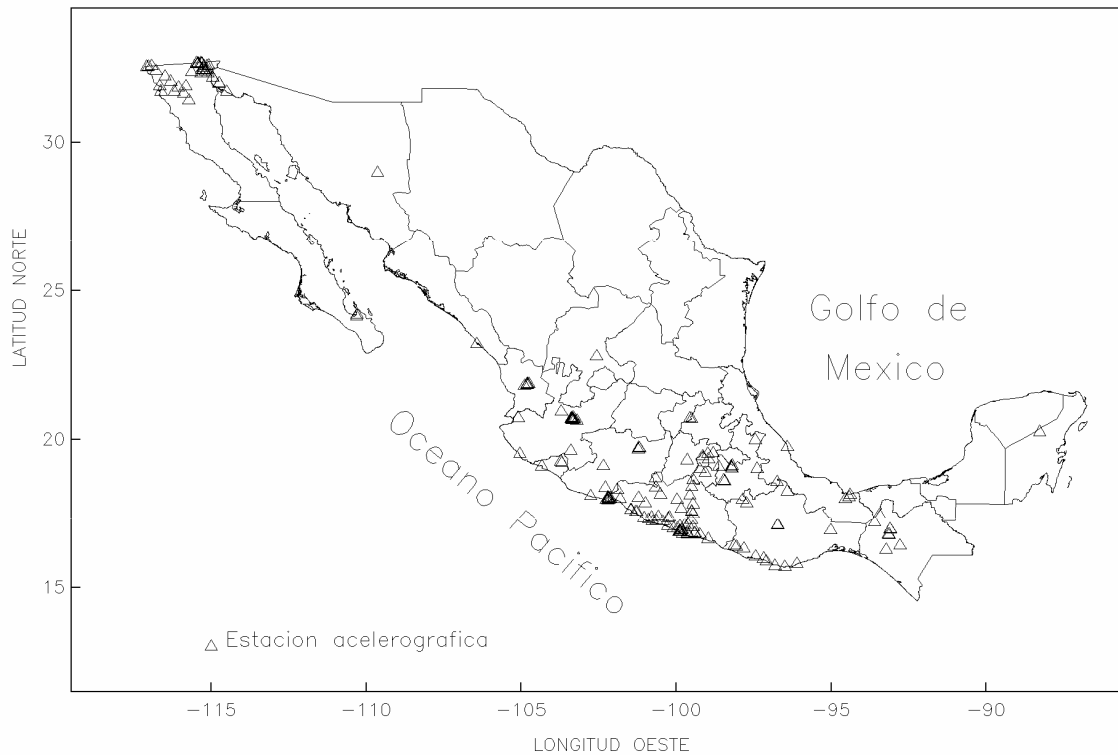


Figura I.2 Estaciones acelerográficas instaladas en México (ref. 10)

Posteriormente, en 1985 se instala una estación en Pinotepa Nacional (PNTN), seguido del Instituto de Geofísica de la UNAM, el cual también pone en operación dos estaciones de registro la primera en el lugar ya mencionado y otra localizada en Huatulco, ambas colocadas en roca. No obstante lo anterior, seguía existiendo una franja costera que no estaba monitoreada.

Estudios de la actividad sísmica a lo largo de la zona de subducción mexicana y el registro instrumental de los sismos que en ella se generan, han permitido establecer diferentes zonas como fuente potencial de generación de temblores de gran intensidad, una de ellas es la zona centro de Oaxaca (97.3° a 97.7°), razón por la cual se decidió llevar a cabo un proyecto de instalación de la red acelerográfica en tal estado, el cual cubre la zona costera de Huatulco (Oaxaca) a Ometepec (Guerrero), así como una línea de atenuación hacia la ciudad de Oaxaca (ref.11), que se prolonga hasta la ciudad de Puebla.

Las estaciones que configuran la Red de la Costa (RAO) son: Huatulco (HUIG), Puerto Ángel (PANG), Las Negras (LANE), Río Grande (RIOG), Jamiltepec (JAMI), Pinotepa Nacional suelo (PNTP), Pinotepa Nacional roca (PNIG) y Ometepec (OMTP). La instrumentación de la RAO permitirá establecer la forma en que el movimiento sísmico se atenúa cuando se propaga en dirección paralela a la costa.

La selección de los sitios de la RAO se basó principalmente en la calidad de la roca, en la seguridad del sitio y en la facilidad de acceso, todo ello con la finalidad de garantizar un monitoreo permanente.

Una vez generado un movimiento sísmico, es importante determinar la forma en la que las ondas se atenúan al propagarse continente adentro y la posterior amplificación de las mismas cuando se filtran en los diferentes estratos del suelo y arriban a la superficie. Para lograr lo anterior, se implementó una línea imaginaria que inicia en Puerto Ángel y se dirige hacia las ciudades de Oaxaca y Puebla, en este trayecto se instalaron estaciones acelerográficas en roca, en las poblaciones de Puerto Ángel (PANG), Tamazulapan (TAMA), San Martín Los Canseco (SMLC), Ciudad de Las Canteras (OXLC), Chila de las Flores (CHFL), Raboso (RABO) y Ciudad Serdán (CSER); las tres últimas localizadas en el estado de Puebla y las restantes en Oaxaca, tal como se muestra en la figura I.3.

La Red Local en la Ciudad de Oaxaca. A lo largo de su historia la ciudad de Oaxaca se ha visto afectada por eventos sísmicos generados tanto en la zona de subducción mexicana como continente adentro, tal es el caso de los temblores de 1931 ($M = 7.8$), 1980 ($M_w = 7.0$) y recientemente los del 15 de Junio ($M_w = 7.0$) y 30 de Septiembre ($M = 7.5$) ambos en 1999. Sin embargo, poco se conoce acerca de la respuesta sísmica del subsuelo de la ciudad de Oaxaca y la forma en que los efectos de sitio modifican los movimientos sísmicos. Por lo que, con el objetivo de estudiar estos aspectos, se instaló la Red de Acelerógrafos en esa ciudad. Estos trabajos de instrumentación complementados con la instalación de la RAO y la Línea de atenuación de Puerto Ángel servirán para investigar la forma en que las ondas sísmicas se propagan tanto a lo largo de la costa como continente adentro y el efecto de atenuación que éstas sufren cuando lo hacen en ambas direcciones.

Además, con la red sísmica en la ciudad de Oaxaca, se podrá evaluar la amplitud del movimiento en un sitio de referencia en roca, así como el nivel de amplificación que la señal sufre al filtrarse en los diferentes tipos de suelo.

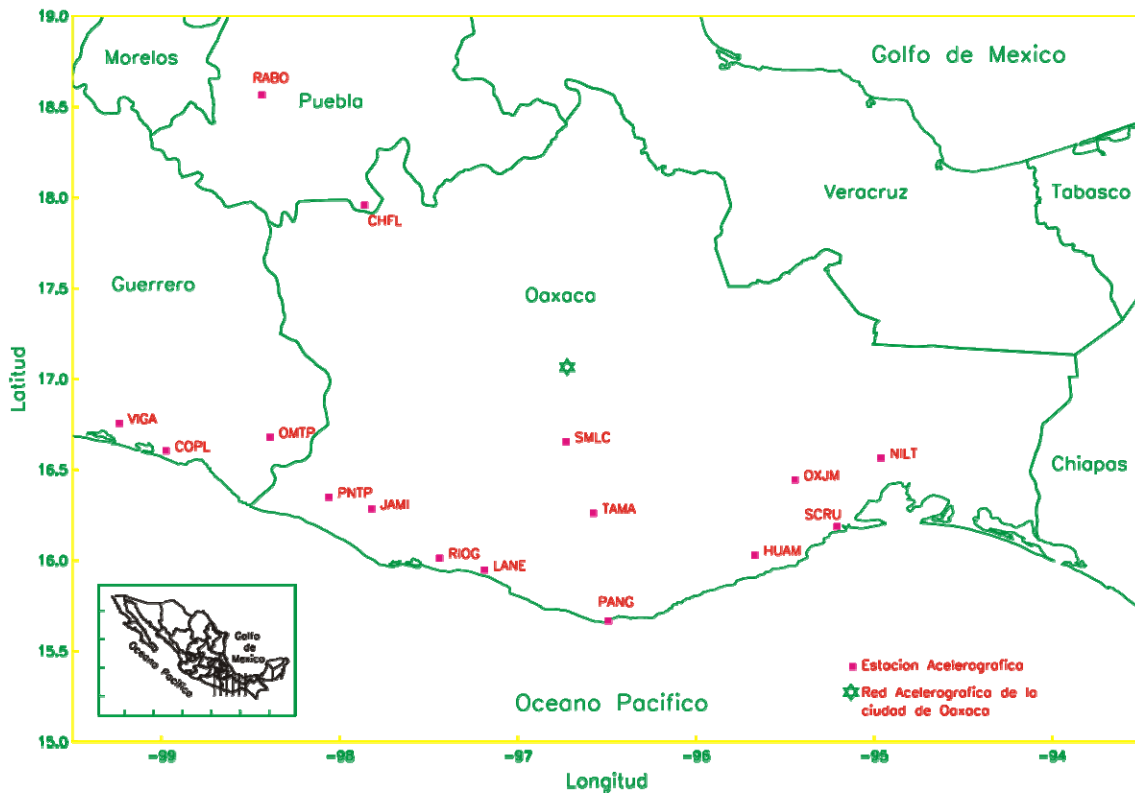


Figura 1.3 Ubicación de las estaciones en los estados de Oaxaca, Puebla y Guerrero

Pese a que aún no se pensaba en una instrumentación sísmica local, en 1970 se instaló en la facultad de medicina de la Universidad Autónoma Benito Juárez de la ciudad de Oaxaca, la estación OXFM, iniciando su operación con un equipo del tipo SMA-1 el cual fue sustituido posteriormente por un acelerógrafo DCA-333. Posteriormente, en 1998 se instala la estación OXLC en la ciudad de las Canteras, construida sobre un afloramiento de cantera y cuyos registros serán vitales para los estudios de amplificación del suelo.

En 1999, el IdeI instaló 5 estaciones acelerográficas en diferentes tipos de suelo dentro de la ciudad, la selección de los sitios se realizó considerando la zonificación preliminar establecida para el valle de Oaxaca en 1991 (ref. 12), en esta se tomó en cuenta la información geotécnica disponible y un estudio de amplificación relativa de vibración ambiental, lo que permitió definir curvas de isoperiodos, niveles de amplificación relativa y un mapa de microzonificación sísmica.

Una visión general de la ubicación de las estaciones acelerográficas se presenta en la figura I.4, las cuales se localizan específicamente en: las instalaciones de la División de Ciencias de la Tierra del Instituto Tecnológico de Oaxaca (OXTO), en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma Benito Juárez (OXCU) y tres más en la zona histórica de la ciudad, en las escuelas primarias Mugica (OXPM) y Benito Juárez (OXBJ) y finalmente en la Alameda de León frente a la Catedral de Oaxaca (OXAL). En la tabla 1, se incluye información relevante relacionada con la ubicación de las estaciones. Cabe señalar que la Red Acelerográfica de La ciudad de Oaxaca (RACO) inició así su operación formal en Octubre de 1999.

Tabla 1. Estaciones de la Red Acelerográfica de la Ciudad de Oaxaca

NOMBRE DE LA ESTACIÓN	CLAVE	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		DEPÓSITO	LOCALIZACIÓN
		LAT. N	LONG. W		
OAXACA FACULTAD DE MEDICINA	OXFM	17.084	96.710	Aluvial	Fuente de las siete regiones a 2 km del centro de Oaxaca
OAXACA LAS CANTERAS	OXLC	17.060	96.700	Roca	Parque de las Canteras, junto al estadio de fútbol
OAXACA PRIMARIA MUGICA	OXPM	17.061	96.717	Arcilla Limosa	Instalaciones de la escuela primaria Mugica
OAXACA PRIMARIA BENITO JUÁREZ	OXBJ	17.067	96.744	Arcilla Limosa	Instalaciones de la escuela primaria Benito Juárez
OAXACA ALAMEDA DE LEÓN	OXAL	17.061	96.726	Arcilla Limosa	Frente a la catedral, en el centro de Oaxaca
OAXACA CIUDAD UNIVERSITARIA	OXCU	17.049	96.713	Arcilla	Estacionamiento de la Facultad de Arquitectura en CU, Oaxaca
OAXACA INSTITUTO TECNOLÓGICO	OXTO	17.078	96.744	Aluvial	Instalaciones del Instituto Tecnológico de Oaxaca, División de C. de la Tierra

Ubicación de las estaciones en la ciudad de Oaxaca. El arreglo de las estaciones de la se determinó bajo la consideración de los siguientes criterios que son:

- Alcanzar una cobertura general de una zona urbana de alto riesgo sísmico en la ciudad, de acuerdo a la microzonificación preliminar.
- Instrumentar sitios con diferentes condiciones de subsuelo.
- Contar con una referencia en roca.

Dado que la instalación de una estación sísmica se planea para que opere por tiempo indefinido, fueron consideradas localidades apropiadas que brinden seguridad y que ofrezcan libre acceso para la recolección de datos. También, debe procurarse la mejor protección contra la intemperie y el fácil acceso a la acometida de corriente eléctrica. Por lo anterior se han preferido áreas dentro de algún parque, escuela u oficina que brinden las ventajas antes descritas.

Una vez determinado el sitio, se realizan pruebas de ruido sísmico para detectar probables fuentes de perturbación que originen falsas activaciones de los acelerógrafos. Las pruebas se realizan colocando un equipo acelerográfico en el punto previamente seleccionado y se opera a diferentes niveles de activación. Los registros obtenidos se analizan y si las perturbaciones locales son excesivas (por ejemplo mayor a 4 gal [cm/s^2]) el lugar es descartado. En las figuras I.5 a I.11 se presenta la localización de cada estación (ref. 13).

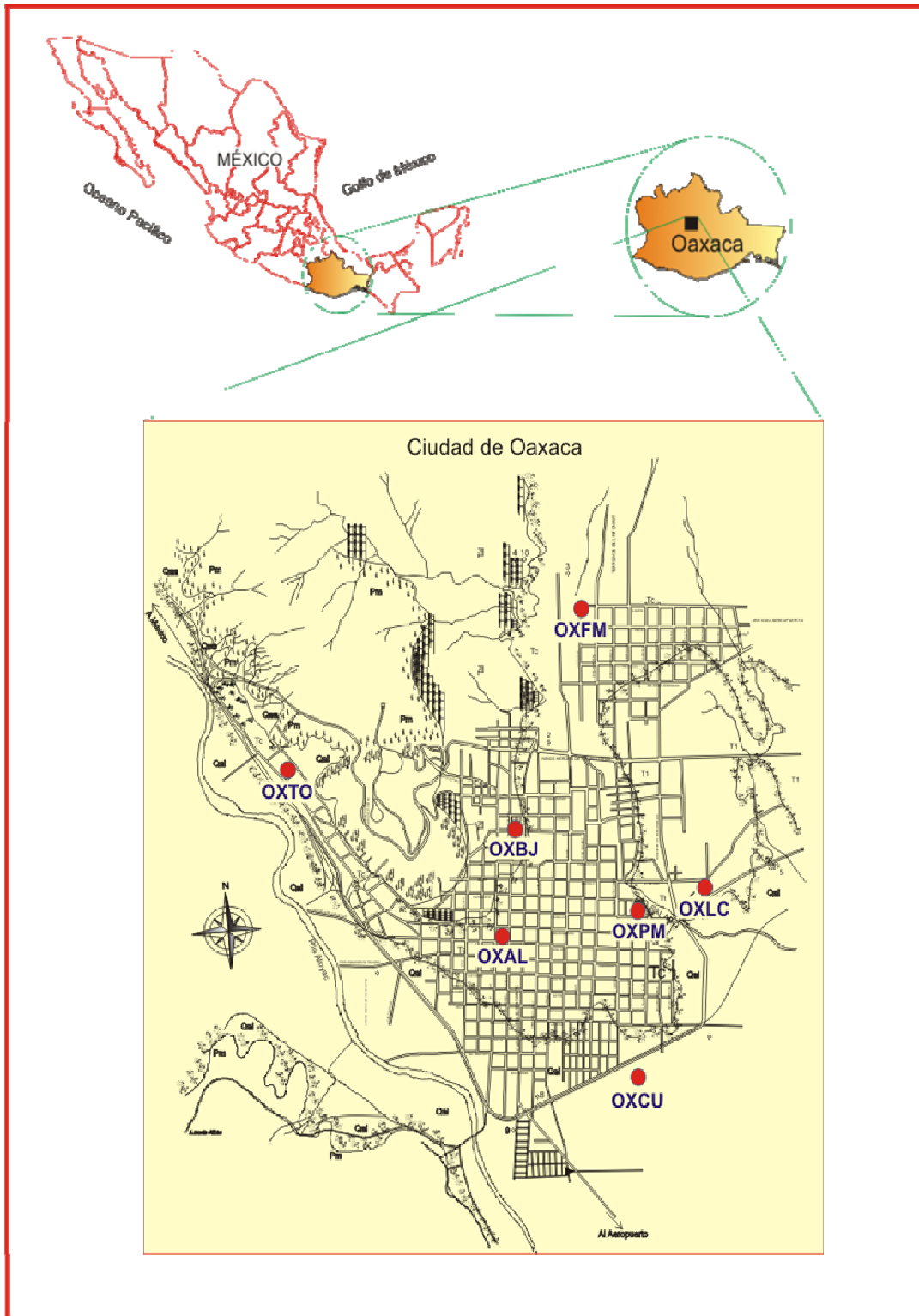


Figura I.4 Ubicación de las estaciones acelerográficas de la RACO (ref. 14)

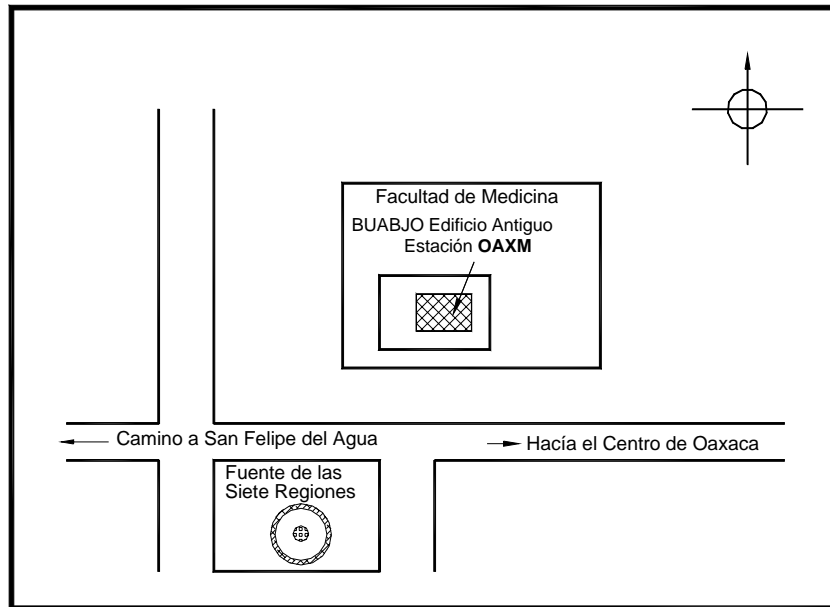


Figura I.5 Estación Facultad de Medicina (OXFM)

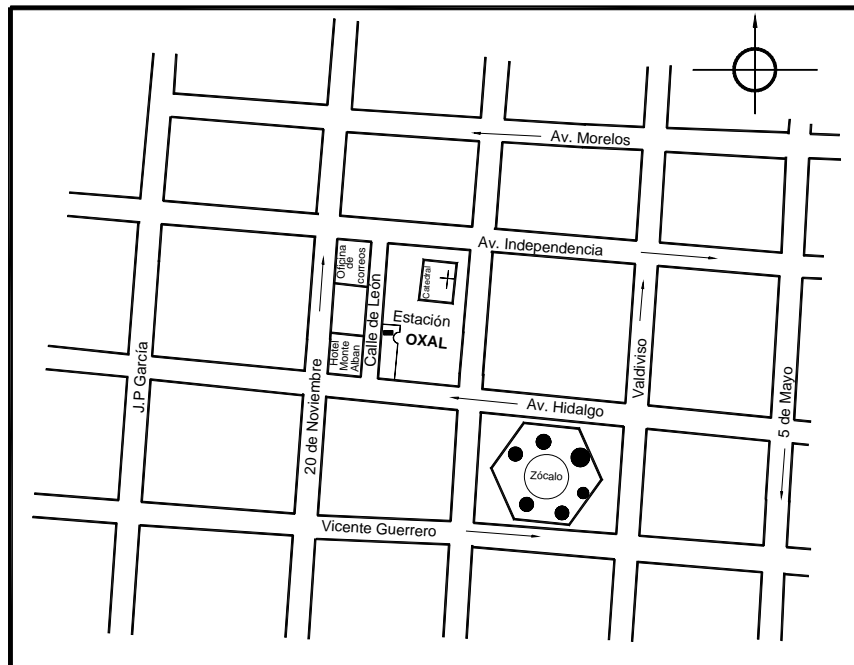


Figura I.6 Estación Alameda de León (OXAL)

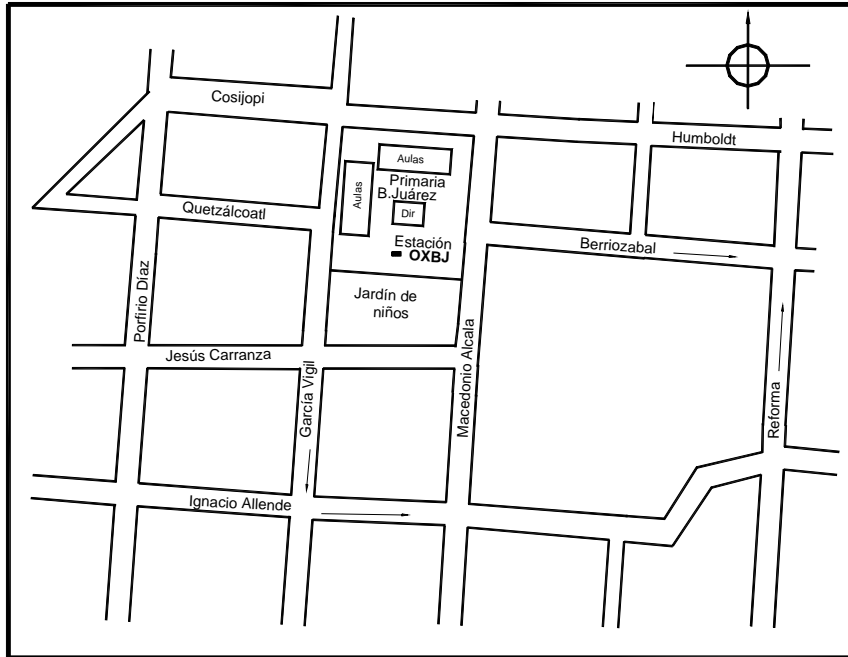


Figura I.7 Estación Primaria Benito Juárez (OXB)

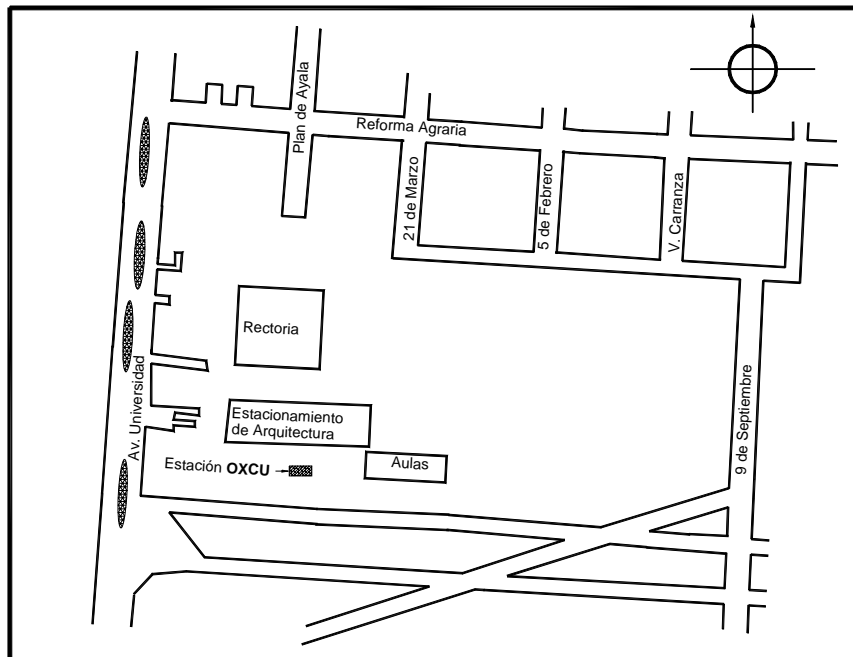


Figura I.8 Estación Ciudad Universitaria (OXCU)

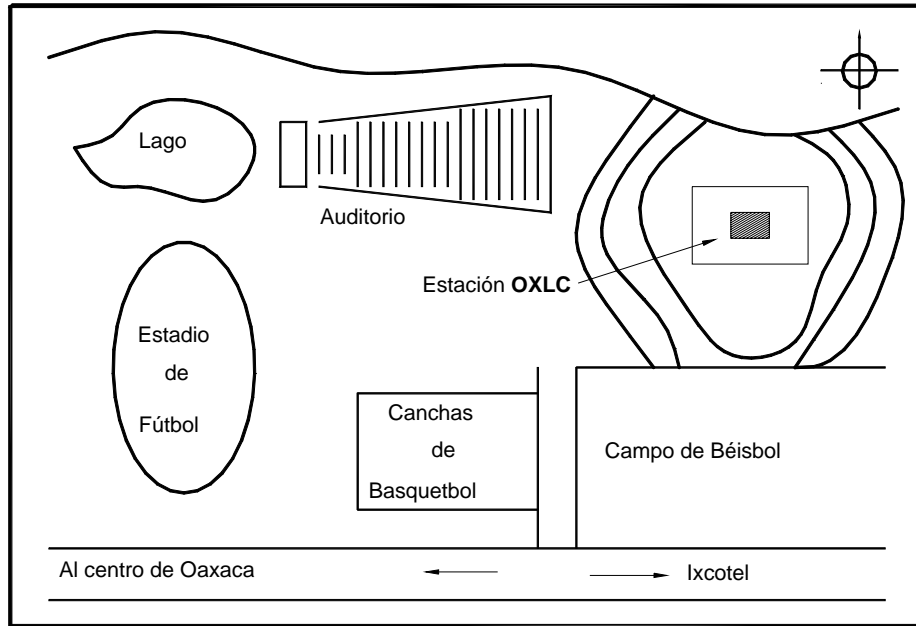


Figura I.9 Estación Las Canteras (OXLC)

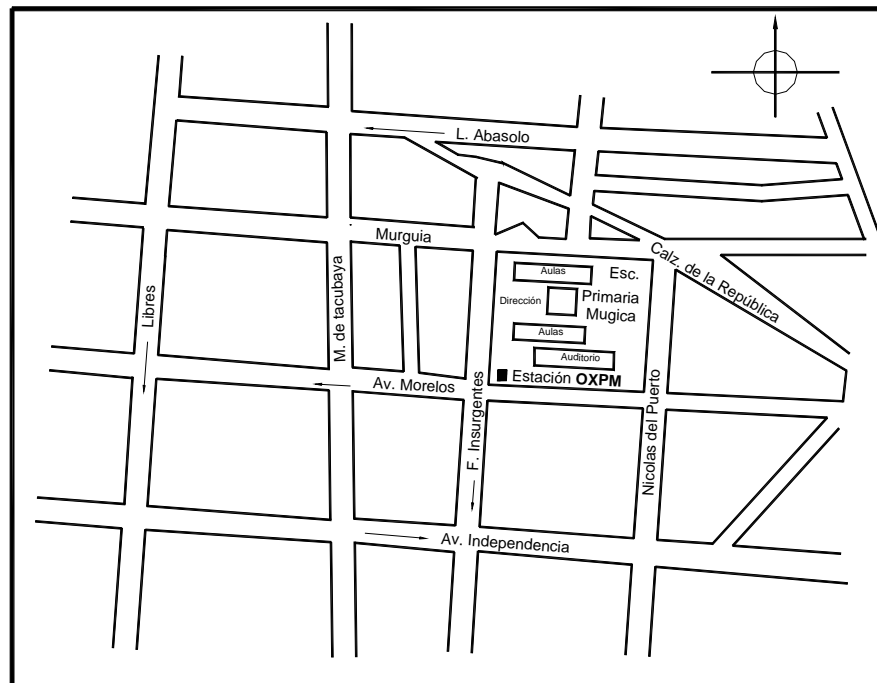


Figura I.10 Estación Primaria Mugica (OXPM)

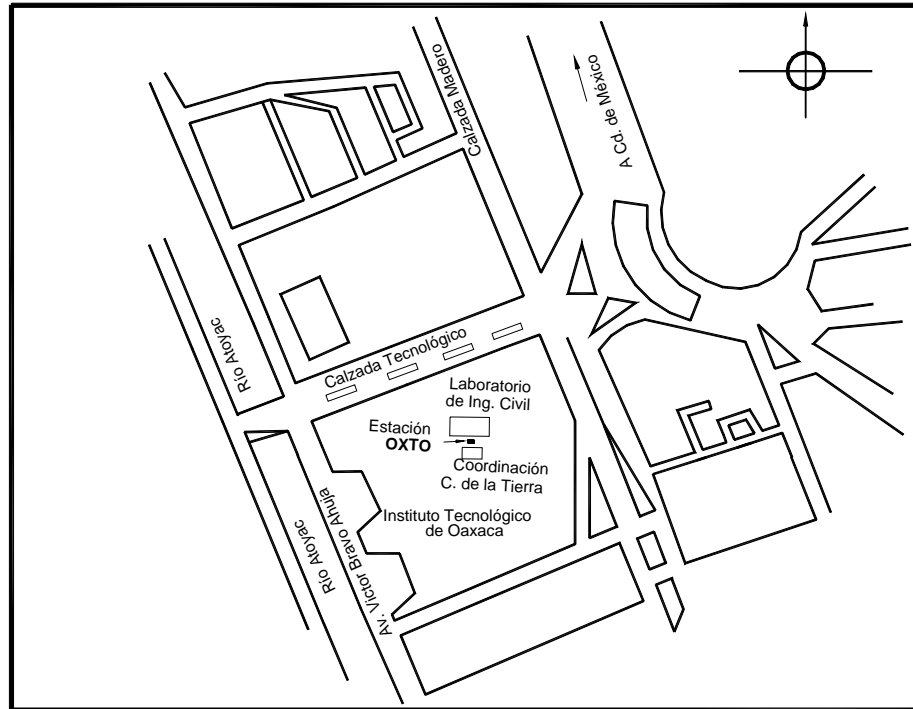


Figura I.11 Estación Instituto Tecnológico de Oaxaca (OXTO)

I.2 Equipo de registro sísmico

Un acelerógrafo se puede dividir en dos partes principales, los sensores y el registrador, los primeros están constituidos por acelerómetros cuyo número y arreglo dependerán de la aplicación en particular, siendo la disposición “triaxial”, es decir tres acelerómetros en posición mutuamente ortogonal, la más empleada.

El registrador a su vez se divide en tres partes, la primera de conversión análogo-digital, una segunda de control y finalmente una de almacenamiento. Su operación consiste en convertir continuamente las señales analógicas de los sensores a muestras digitales, las cuales son comparadas en la unidad de control y mediante un algoritmo especial de activación se verifica cada una de ellas, si se satisface un umbral de disparo programado, se inicia el almacenamiento hasta que se deja de cumplir la condición dada. La información es registrada ya sea en cinta magnética ó memoria de estado sólido.

Un registro dado puede tener su inicio desde antes de que se cumpla el criterio de disparo del aparato, a este lapso de tiempo se le conoce como Memoria de Pre-evento; así mismo, cuenta también, con Memoria de Post-evento, la cual registra los valores de aceleración durante un tiempo fijado, posteriores al cumplimiento de la condición de arranque.

Tanto los sensores como el registrador operan con cargadores (fuentes de alimentación), celdas solares y baterías, que a su vez se recargan a través de un cargador de AC o de una celda solar en caso de no disponer o desconfiar de la alimentación. Dentro de cada acelerógrafo, se localiza un reloj que permite conocer la fecha y hora de registro del evento.

Debido a que los acelerógrafos son fabricados en número reducido, por sólo unas cuantas compañías, no existe uno ideal para todos los casos; en general se busca que funcione continuamente y registre los eventos cuando ocurran, para esto se toma en cuenta su fácil manejo, el margen de grabación de pre-evento, evento y post-evento; así como la compatibilidad de las señales con las herramientas de computación disponibles para su proceso. Los instrumentos seleccionados, dadas sus características tanto técnicas como económicas, al inicio de operación de la RACO fueron de marca Terra Technology modelo digital DCA-333 y posteriormente se integraron los modelos ETNA de Kinometrics. El DCA-333 censa continuamente a razón de 100 muestras por segundo por canal; amplifica, filtra y convierte las señales generadas en forma de palabras de 12 *bits*, en el almacenamiento incluye el tiempo de reloj interno, el número serial del instrumento y el número progresivo de registro, grabándolos en un cassette de cinta magnética. El ajuste del nivel de activación es único, esto es, el mismo para las tres direcciones de registro. Este equipo lo complementa una unidad reproductora y graficadora SMR-104 de la misma marca. Con esta unidad pueden obtenerse de manera inmediata las gráficas correspondientes a señales grabadas.

El acelerógrafo ETNA puede registrar 100, 200 ó 250 muestras por segundo por canal; amplifica, filtra y convierte las señales generadas a palabras de 18 *bits*, grabando la información en una tarjeta de almacenamiento *Flash Card* intercambiable con capacidad máxima de registro de 20 minutos, además el nivel de disparo puede ajustarse con valores diferentes en los tres canales.

En la tabla 2 se describen los parámetros de operación de los equipos acelerográficos que han operado en la RACO. Los equipos instalados actualmente en la red se mencionan en la tabla 3.

Tabla 2. Especificaciones generales de los acelerógrafos

CARACTERÍSTICAS	EQUIPO		
	DCA-333	ETNA (K2)	ETNAEPI
Fabricante	Terra Technology	Kinematics	Kinematics
Tipo	Digital	Digital	Digital
Medio de registro	Casete Digital o Ramdeck	Tarjeta <i>flash Card</i>	Tarjeta <i>flash Card</i>
Transductores (3)	Internos por balance de fuerzas	Internos por balance de fuerzas	Internos por balance de fuerzas Episensor Deck
Escala de registros [g]	0.25-1	1-2	Variable 0.25, 0.5, 1, 2, 4
Frecuencia natural [Hz]	30	50	200
Amortiguamiento	0.7	0.7	0.7
Tiempo de registro [min]	14	40	60 para 200 muestras
Tasa de muestro [muestras/s]	100	100,200 ó 250	100, 200 ó 250
Longitud de palabra [bit]	12	18	18
Rango Dinámico [dB]	72	108	108
Referencia de tiempo	Interno	Interno	Interno
Alimentación [volt CD]	+12	+12	+12

Tabla 3. Equipos instalados en la RACO

NOMBRE DE LA ESTACIÓN	CLAVE	EQUIPO INSTALADO				
		TIPO	# SERIE	ORIENTACIÓN		
				C1	C2	C3
Oaxaca, ciudad universitaria	OXCU	ETNA	1022	N90W	VERT	N00E
Las Canteras	OXCL	ETNA	1328	N90W	VERT	N00W
Instituto Tecnológico	OXTO	ETNA	1918	N00W	N90W	VERT
Escuela Primaria Mugica	OXPM	ETNA	1917	N90W	VERT	N00W
Escuela Primaria Benito Juárez	OXBJ	ETNA	1020	N90W	VERT	N00W
Facultad de Medicina	OXFM	ETNA	4441	N00W	N90E	VERT
Alameda de León	OXAL	ETNA	1531	N90W	VERT	N00W

I.3 Registros obtenidos

Las estaciones sísmicas que integran la RACO, han producido una gran cantidad de registros de aceleración, los cuales fueron generados por sismos ocurridos en las regiones que influyen en el estado de Oaxaca y cuya intensidad ha sido suficiente para alcanzar los niveles de activación predeterminados en al menos una de las estaciones. En la tabla 4 se presentan los registros obtenidos desde el 28 de septiembre de 1973 hasta el 09 de febrero del 2006 en las siete estaciones de la RACO (ref.15).

Tabla 4. Registros obtenidos en la RACO.

Núm. Sismo	Fecha	M	Estación							Núm. Sismo	Fecha	M	Estación							
			OXCU	OXLC	OXTO	OXPM	OXBJ	OXFM	OXAL				OXCU	OXLC	OXTO	OXPM	OXBJ	OXFM	OXAL	
1	19730828	6.8							x	33	20010908	4.8	x	x	x					x
2	19781129	7.8							x	34	20011003	4.4	x	x	x	x	x	x		x
3	19801024	7			x				x	35	20011110	6		x	x					
4	19820607	7							x	36	20011128	6		x						
5	19830124	5.3							x	37	20020116	6.3	x	x						
6	19940704	5.9							x	38	20020130	5.1	x	x	x	x	x			
7	19940827	5							x	39	20020226	5		x						
8	19940828	5.2							x	40	20020511	4.5		x	x					
9	19950914	7.2							x	41	20020607	4.7	x	x						
10	19960401	5							x	42	20020607	5.6	x	x	x	x	x	x	x	x
11	19980203	6.2							x	43	20020609	4.4	x							
12	19980502	4.4							x	44	20020611	4.9		x						
13	19990615	7		x					x	45	20020618	4.5							x	
14	19990615	4.5		x					x	46	20020805	5.3	x	x	x	x			x	
15	19990930	7.5		x					x	47	20020827	4.9	x	x	x	x	x	x	x	x
16	19991007	4.4			x				x	48	20021108	5.2	x	x						
17	19991025	4.6			x					49	20021202	4.7	x	x						
18	19991106	4.5		x	x	x			x	50	20021229	4.6	x	x	x				x	
19	19991110	4.3			x	x			x	51	20030122	7.6		x						
20	19991129	4.4			x					52	20030201	5.3		x						
21	19991217	4.4			x	x				53	20030613	4.1		x						
22	20000119	4.5		x	x	x				54	20030708	4.6		x						
23	20000301	4.7		x	x	x			x	55	20030925	4.6		x						
24	20000312	6.4		x	x					56	20031201	4.3	x	x	x					x
25	20000510	4.7			x	x			x	57	20040113	5.1	x	x	x	x			x	x
26	20000721	5.9			x					58	20040113	5.5	x	x	x	x			x	x
27	20000817	4.4			x					59	20040114	4.6		x						
28	20000929	4.7		x	x	x				60	20040117	4.7	x	x	x	x			x	x
29	20001017	5.4			x					61	20040210	4.4	x	x					x	x
30	20010126	5			x					62	20040218	4.3	x	x	x	x			x	x
31	20010219	4.8			x					63	20040420	5.4	x	x	x				x	x
32	20010220	4.7			x					64	20040506	4.3	x	x						

Tabla 4. Continuación

Núm. Sismo	Fecha	M	Estación							Núm. Sismo	Fecha	M	Estación										
			OXCU	OXLC	OXTO	OXPM	OXBJ	OXFM	OXAL				OXCU	OXLC	OXTO	OXPM	OXBJ	OXFM	OXAL				
65	20040614	5.8	x		x	x			x	x	77	200510121	4.3				x					x	
66	20040801	4.6			x				x	x	78	200511061	4.8			x							
67	20040807	5.3		x	x	x		x	x	x	79	200511111	3.5					x					
68	20040818	5.7		x	x	x		x	x	x	80	200511211	4.4	x		x					x		x
69	200410251	4.5	x		x	x			x	x	81	200512021	4.8	x		x					x		
70	200411021	4.5	x		x						82	200512091	4.8	x		x					x		
71	200411151	5.1	x		x						83	200512221	4.2			x					x		
72	200411152	4.5			x						84	200601101	3.8					x					
73	200412101	5.1	x	x	x				x		85	200601181	4.9			x					x		
74	200508141	5.8					x				86	200601191	4.2	x	x	x					x		x
75	200509081	4.4		x	x	x			x	x	87	200602091	4.3			x					x		
76	200509241	4.7		x	x	x		x	x														

Respecto a la red de acelerógrafos de la ciudad de Oaxaca, durante el período mencionado, el número de acelerogramas generados es de 223, los cuales han sido producto de 87 sismos cuyas magnitudes van de 4.1 a 7.8. La aceleración máxima registrada en la historia de la red ha sido de 370 cm/s^2 en la estación OXFM durante el sismo del 30 de septiembre de 1999 (M=7.5).

CAPÍTULO II

DETERMINACIÓN DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EMPÍRICAS

II. DETERMINACIÓN DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EMPÍRICAS

II.1 Selección de Registros

La tabla 4 integra los registros obtenidos por la RACO desde el 28 de septiembre de 1973 hasta el 09 de noviembre del 2006, sin embargo no todos los registros son de utilidad para la estimación de los espectros de respuesta. Sólo se utilizaron los eventos en los cuales existe registro en la estación Las Canteras (OXLC) y al menos en una estación en suelo. La tabla 5, muestra dichos eventos.

Tabla 5. Registros Seleccionados de la RACO

CLAVE SISMO	FECHA SISMO aaaammde	ESTACIÓN DE REGISTRO SÍSMICO						
		OXCU	OXLC	OXTO	OXPM	OXBJ	OXFM	OXAL
13	199906151		*				*	
14	199906152		*				*	
15	199909301		*				*	
18	199911061		*	*	*		*	*
22	200001191		*	*	*			
23	200003011		*	*	*		*	
24	200003121		*	*				
28	200009291		*	*	*			
33	200109081		*	*	*			*
34	200110031		*	*	*	*	*	*
37	200201161		*	*	*			
38	200201301		*	*	*	*	*	
42	200206072	*	*	*	*	*	*	*
46	200208051	*	*	*	*		*	
47	200208271	*	*	*	*	*	*	*
57	200401131	*	*	*	*		*	*
58	200401132	*	*	*	*		*	*
60	200401171	*	*	*	*		*	*
62	200402181	*	*	*	*		*	*
67	200408071		*	*	*	*	*	*
68	200408181		*	*	*	*	*	*
73	200412101	*	*	*			*	
75	200509081		*	*	*		*	*
76	200509241		*	*	*	*	*	
86	200601191	*	*	*			*	*

Una vez hecha la selección de los sismos se separaron en dos tipos: superficiales y profundos generados en la zona continental (ref. 16). Para llevar acabo tal clasificación se tomó en cuenta la localización epicentral de los eventos, así como la profundidad reportada por el Servicio Sismológico Nacional (ref. 17). En la tabla 6 se muestran los resultados del análisis anterior y en la figura II.1 su ubicación.

Tabla 6. Clasificación de los registros seleccionados

TIPO DE SISMO			
PROFUNDOS		SUPERFICIALES	
Clave	Fecha	Clave	Fecha
13	199906151	15	199909301
14	199906152	18	199911061
24	200003121	22	200001191
28	200009291	23	200003011
33	200109081	42	200206072
34	200110031	46	200208051
37	200201161	47	200208271
38	200201301	57	200401131
60	200401171	58	200401132
62	200402181	73	200412101
67	200408071		
68	200408181		
75	200509081		
76	200509241		
86	200601191		

II.2 Cálculo de Funciones de Transferencia

El espectro de Fourier aplicado al estudio de los acelerogramas es en sí una técnica que permite analizar el contenido de las frecuencias de los movimientos del terreno, producidas por la propagación de las ondas sísmicas a través de este, y relacionándolas con su correspondiente valor de amplitud. Con ellos también es posible determinar relaciones denominadas *Funciones de Transferencia*, las cuales son útiles para inferir la variación del movimiento sísmico de un sitio a otro, cuando la señal se propaga y filtra a través de los diferentes estratos de suelo.

Las Funciones de Transferencia (FT) se calculan por medio de los cocientes espectrales de Fourier, lo que permite establecer los factores de amplificación o atenuación con respecto a un sitio determinado.

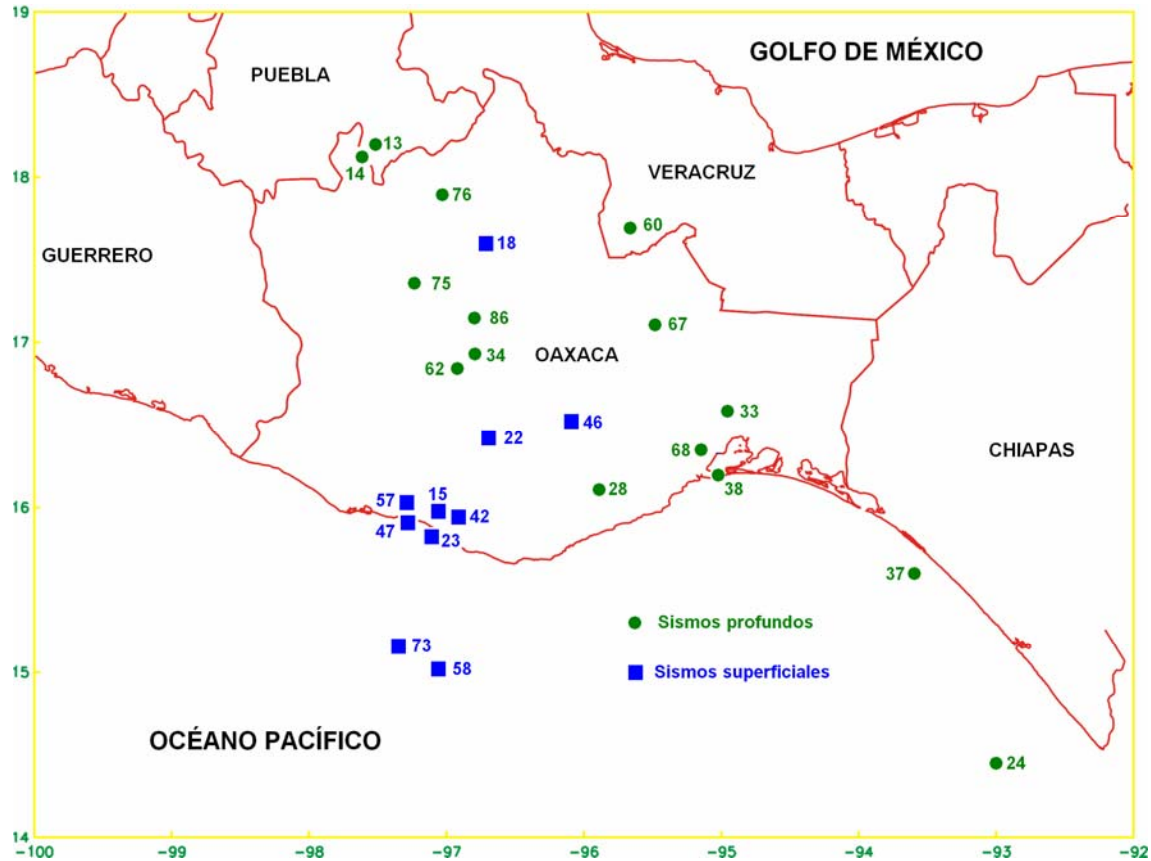


Figura II.1 Ubicación epicentral de los sismos seleccionados

Análisis de Fourier. Una herramienta matemática muy útil para el análisis de señales son las llamadas transformadas lineales, pues permiten reordenar los datos originales tomando en cuenta la frecuencia en lugar del tiempo. En especial, las transformadas de Fourier tienen un amplio uso en diversos campos de la ciencia para resolver algunos problemas; gracias al teorema desarrollado por el matemático Jean Baptiste Joseph Fourier y completado por el alemán Dirichlet, es posible demostrar que toda función periódica continua, con un número finito de máximos y mínimos en cualquier período, puede desarrollarse en una única serie trigonométrica uniformemente a dicha función, conocida como serie de Fourier.

La extensión de estas series a funciones continuas nos lleva a expresiones matemáticas integrales como las transformadas de Fourier con las cuales es posible determinar la relación existente entre el dominio del tiempo y la frecuencia (ref. 18). La esencia de la transformada de Fourier (TF) de una señal es descomponerla o separarla en una serie de senoides de diferentes frecuencias, las cuales corresponden a la suma de la original. Lo anterior permite distinguir o identificar las diferentes frecuencias y sus respectivas amplitudes.

Mediante la siguiente expresión se define la transformada de Fourier:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.1)$$

$F(\omega)$ = Señal transformada al dominio de la frecuencia (ω)

$f(t)$ = Señal en el dominio del tiempo

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.2)$$

ω = Frecuencia en Hz.

T = Periodo en s.

Ya que los registros obtenidos sólo tienen datos de aceleración de tipo discreto, el cálculo numérico realizado por las computadoras digitales requiere ese tipo de muestras, por lo que se desarrolló la transformada discreta de Fourier (DFT), la cual permite su empleo en aplicaciones numéricas calculadas con un algoritmo conocido como transformada rápida de Fourier (FFT). El objetivo de ese algoritmo es reducir el número de cálculos y funciona partiendo la señal completa en un cierto número de subseñales más cortas y calculando la DFT de cada una de estas, posteriormente la FFT combina estas para obtener la DFT de la señal original.

Por otra parte, cuando se aplica la transformada rápida de Fourier a una señal se determina la relación de esta en un dominio de frecuencias. Al graficar esta relación se obtiene el espectro de Fourier (ref. 19), con él se puede hacer una adecuada selección del rango en el que se encuentran las frecuencias altas y bajas asociadas a otro tipo de fenómenos. Este espectro relaciona las amplitudes con el contenido de frecuencias de una señal, se calcula como el valor absoluto de la raíz de la suma de los cuadrados de las partes real e imaginaria de la señal en el dominio de la frecuencia, mediante las siguientes expresiones:

$$|F(\omega)| = [R(\omega)^2 + jX(\omega)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

$$R(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos(\omega t) dt \quad (2.4)$$

$$X(\omega) = - \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \sin(\omega t) dt \quad (2.5)$$

$F(\omega)$ = Señal transformada al dominio de la frecuencia (ω)

(ω) = Frecuencia en Hz.

$f(t)$ = Señal en el dominio del tiempo

$j^2 = -1$

Resulta importante señalar que se deben hacer dos operaciones al registro antes de dar inicio al cálculo propio de los espectros de Fourier: corrección de línea base y filtrado. Lo anterior se debe a que los registros de los movimientos del suelo producidos por un temblor, muchas veces incluyen vibraciones ajenas al propio evento sísmico, como aquellas producidas por el tránsito local, paso de algún vehículo, etc. La figura II.2 muestra un EF a partir de un acelerograma.

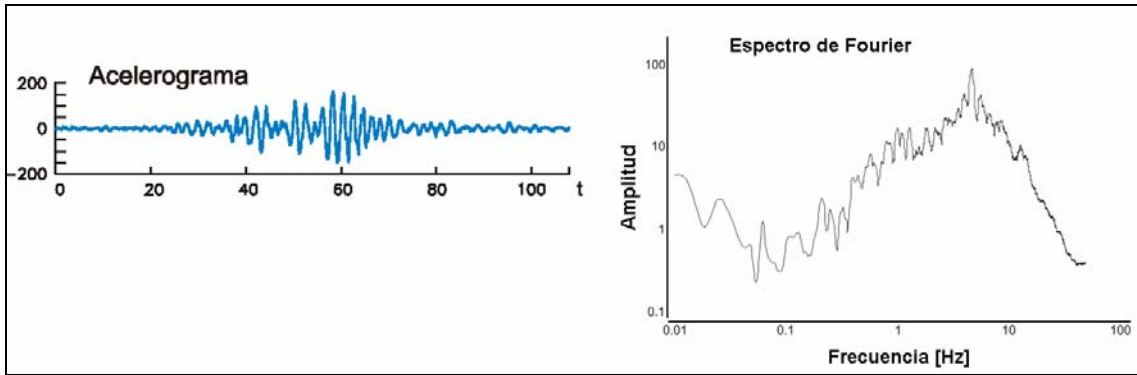


Figura II.2 Cálculo del EF a partir de un acelerograma

Una vez hecho el cálculo de los espectros y tomando en cuenta las consideraciones anteriores es posible realizar la FT tal cómo se observa en la figura II.3.

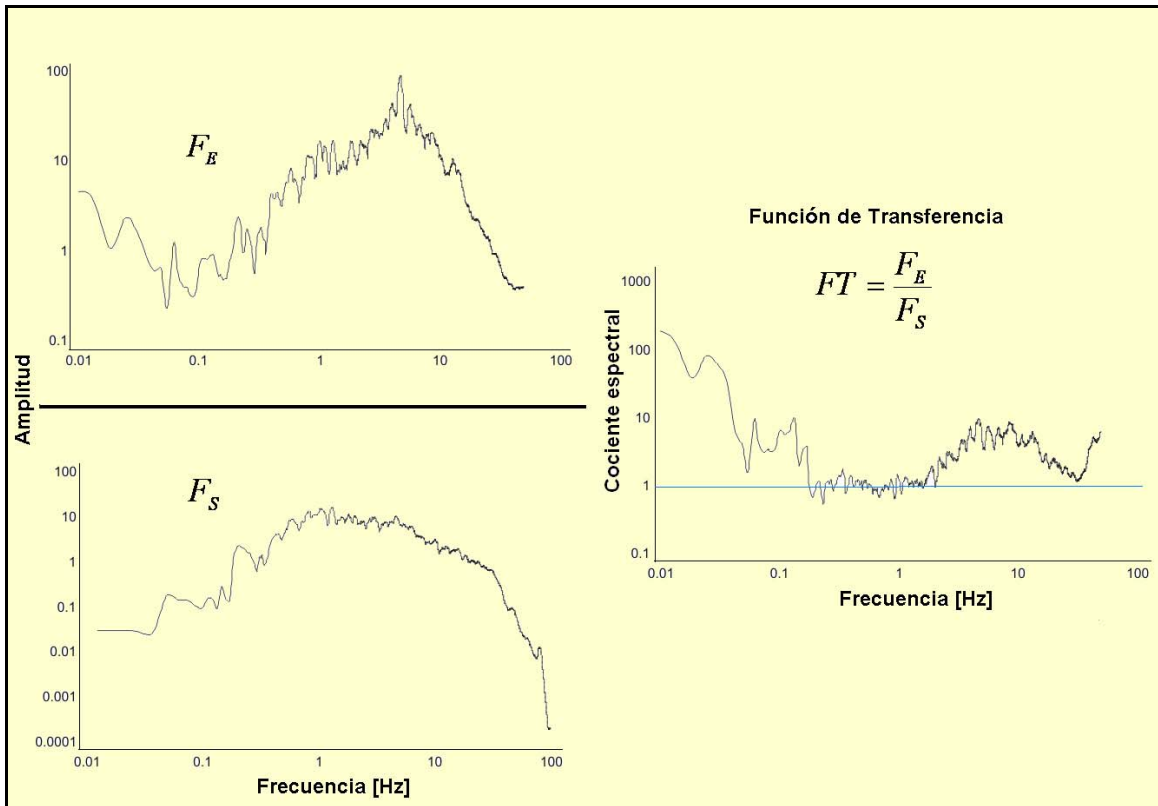


Figura II.3 Cálculo de la FT a partir del cociente espectral

Como se mencionó, las funciones de transferencia son útiles para inferir la variación del movimiento sísmico de un sitio a otro, en este caso de un sitio en roca (OXLC) con otro tipo de suelo (OXCU, OXTO, OXPM, OXBJ, OXFM, OXAL). Esto explica por que se utilizaron sólo eventos en los cuales existió registro en la estación Las Canteras.

Para el cálculo de las funciones de transferencia se utilizó el programa DEGTRA A4 (XP) (ref. 20), con este se leyeron los archivos ASCII estándar de aceleración y se obtuvieron los Espectros de Fourier (EF), considerando un factor de suavizado de 10 y un *Taper* del 5%. Para ello el programa permite abrir por cada componente dos ventanas de lectura de acelerogramas, en la primera se coloca el registro de aceleración de cualquiera de las estaciones en suelo y en la segunda únicamente el registro en roca (OXLC). Ya que se han generado los Espectros de Fourier se realiza el cociente del EF de registro en suelo entre el EF de la estación Las Cantera (OXLC).

Considerando por ejemplo el sismo del 01/03/2000 (evento 23 según tabla 5), del cual se tienen registros de cuatro estaciones, entre ellas OXLC, por lo tanto se pueden realizar nueve funciones de transferencia (3 por cada estación de registro sísmico, ya que se calcula para cada uno de las componentes L, T y V). La tabla 7 muestra de forma esquemática como obtener las FT para este evento.

Tabla 7. FT para el sismo 23

FUNCIONES DE TRANSFERENCIA			
Componente	TO/LC	PM/LC	FM/LC
L, T, V	$\frac{EF_{OXTO}}{EF_{OXLC}}$	$\frac{EF_{OXPM}}{EF_{OXLC}}$	$\frac{EF_{OXFM}}{EF_{OXLC}}$

De esta manera se obtuvieron las funciones de transferencia para los 25 registros seleccionados (tabla 5). En las figuras II.4 a II.6 se presentan las FT para el ejemplo.

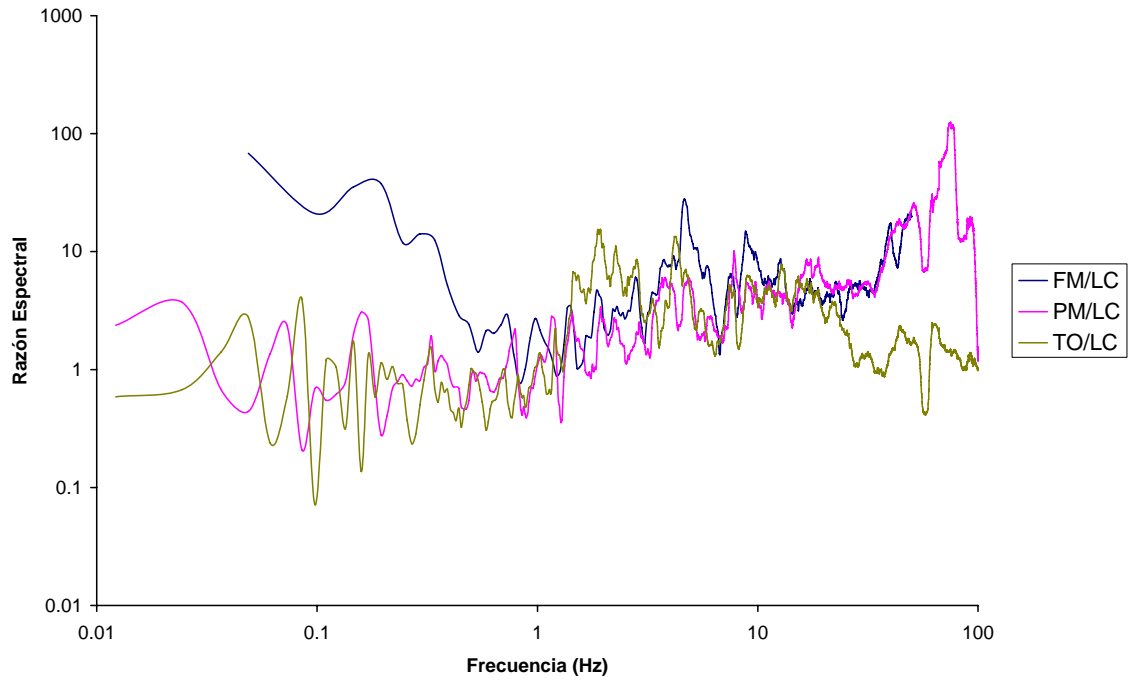


Figura II.4 Funciones de Transferencia para el sismo 23 (L)

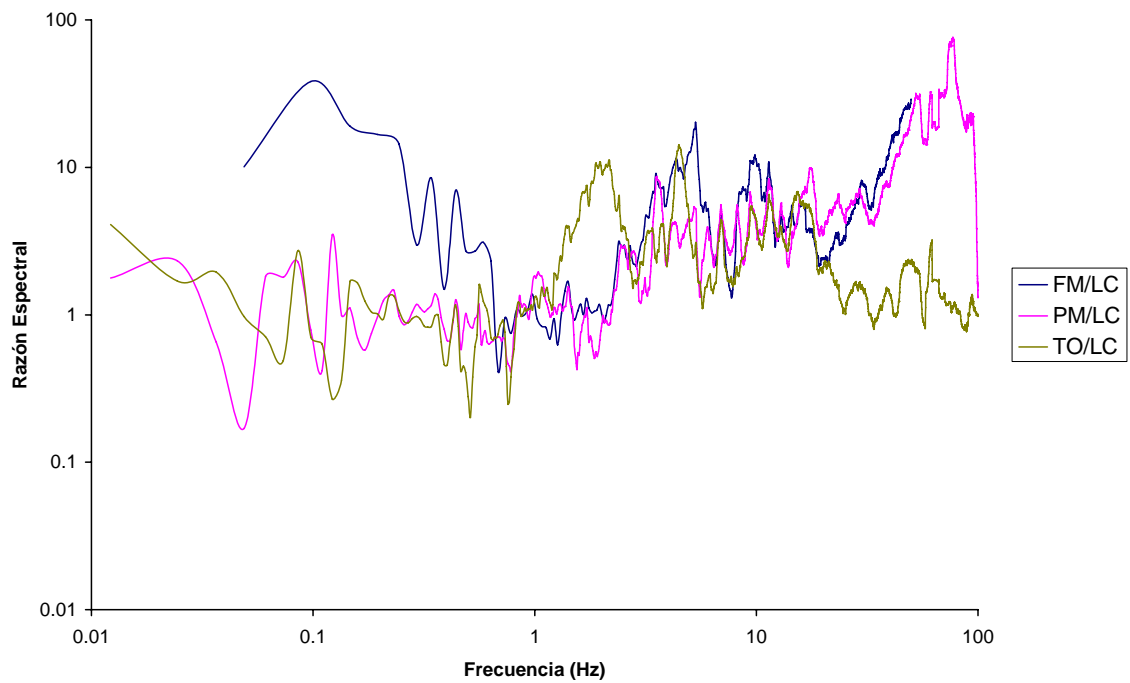


Figura II.5 Funciones de Transferencia para el sismo 23 (T)

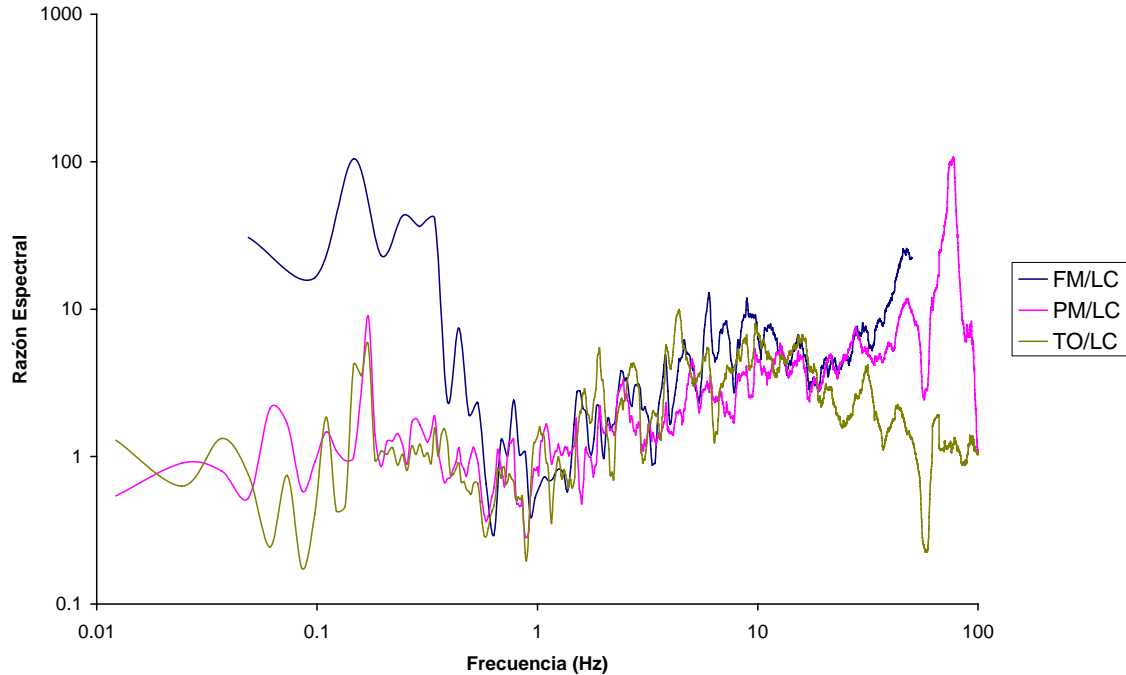


Figura II.6 Funciones de Transferencia para el sismo 23 (V)

II.3 Funciones de Transferencia Promedio

Primer método. Una vez generadas las FT de todos los eventos, se agruparon por estación de registro sísmico, después se separaron los eventos según la clasificación de la tabla 6. Posteriormente, se obtuvieron las Funciones de Transferencia Promedio (FTP) para cada estación y componente, tanto para los eventos superficiales como profundos, por lo que se obtuvieron seis promedios por cada estación. En el caso de la estación Oaxaca Alameda de León (OXAL) se tienen trece sismos registrados, de los cuales cinco son considerados superficiales y ocho profundos (tabla 8). En las figuras II.7 y II.8 se presentan las FTP obtenidas en el componente L para dicha estación.

Tabla 8. Funciones de Transferencia Promedio

ESTACIÓN OXAL				
		Eventos superficiales		Eventos Profundos
Componente	Clave sismo	Función de Transferencia Promedio	Clave sismo	Función de Transferencia Promedio
L	18	FTP AL/LC (L)	33	FTP AL/LC (L)
	42		34	
T	47	FTP AL/LC (T)	60	FTP AL/LC (T)
	57		62	
	58		67	
V	58	FTP AL/LC (V)	68	FTP AL/LC (V)
			75	
			86	

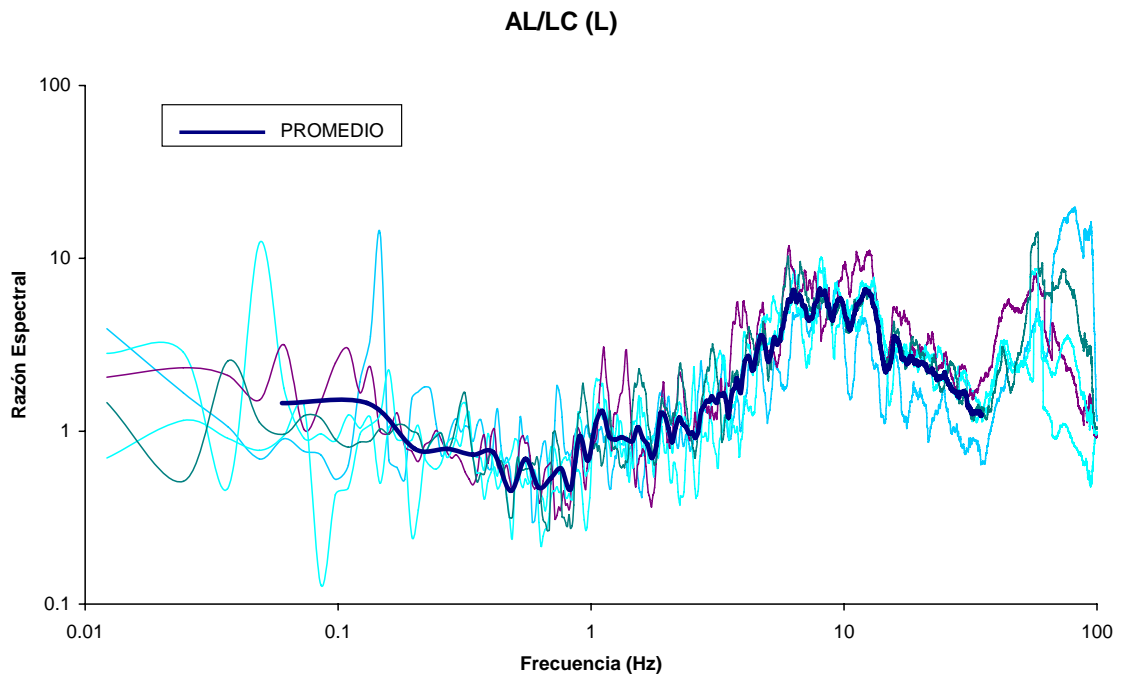


Figura II.7 Función de Transferencia Promedio eventos superficiales, L

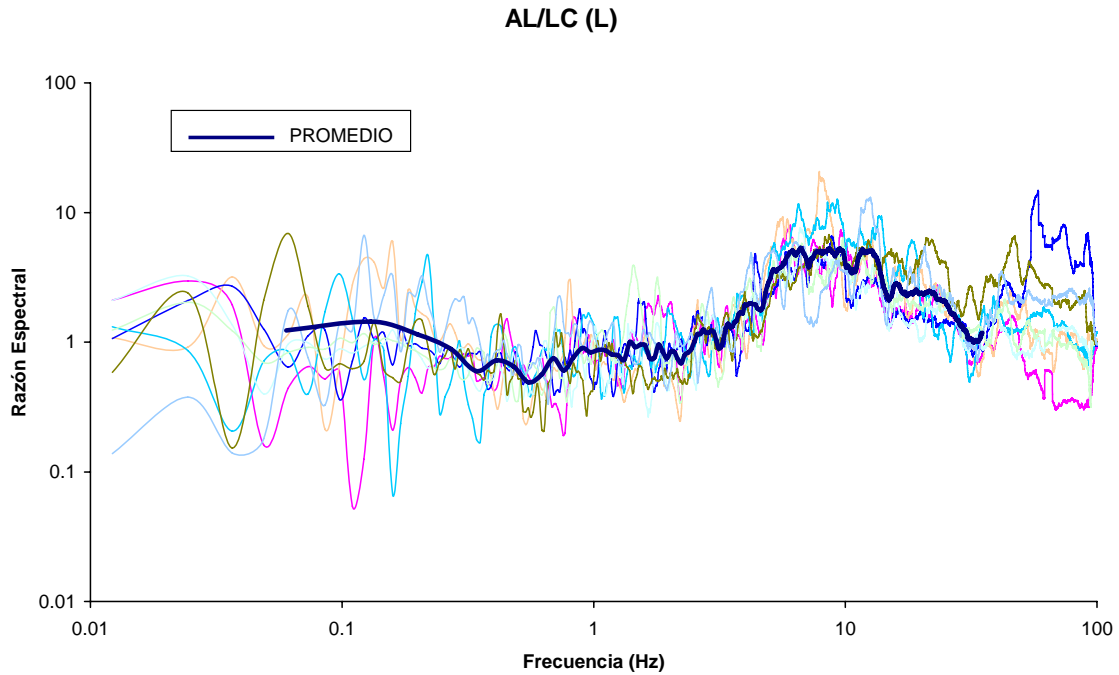


Figura II.8 Función de Transferencia Promedio eventos profundos, L

Finalizadas las FTP por estación de registro sísmico, se obtuvo un promedio que contempla tanto la componente L como la T, a este se le llama Función de Transferencia Promedio Horizontal (FTPH). En el caso de la componente vertical no hay cambios, el promedio sólo se renombra como Función de Transferencia Promedio Vertical (FTPV). Esta nueva nomenclatura sirve para identificar a cada promedio según los eventos que lo originaron.

Segundo método. Mediante este procedimiento se generaron las FTP tomando en cuenta todos los registros de cada sitio, por lo que ahora sólo se tienen tres promedios por estación, correspondientes únicamente a las componentes (L, T y V). La figura II.9 muestra las FT y su promedio para la estación OXAL del componente L. Finalmente en la figura II.10 se comparan los resultados obtenidos por ambos métodos de cálculo.

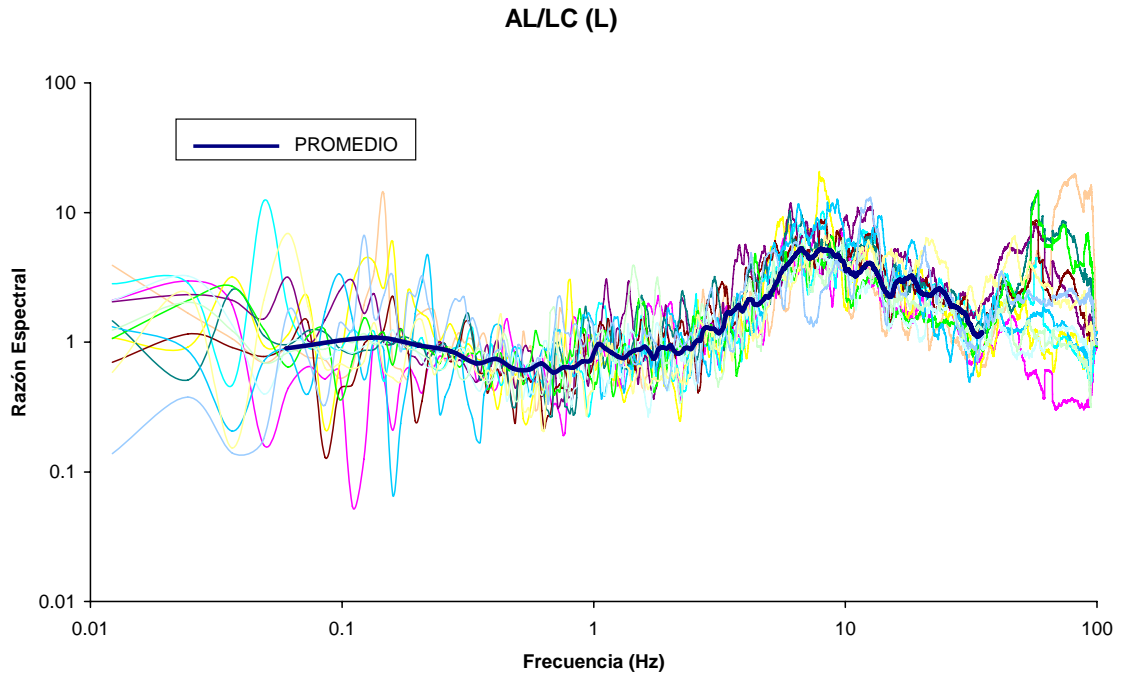


Figura II.9 Funciones de Transferencia para todos los sismos, L

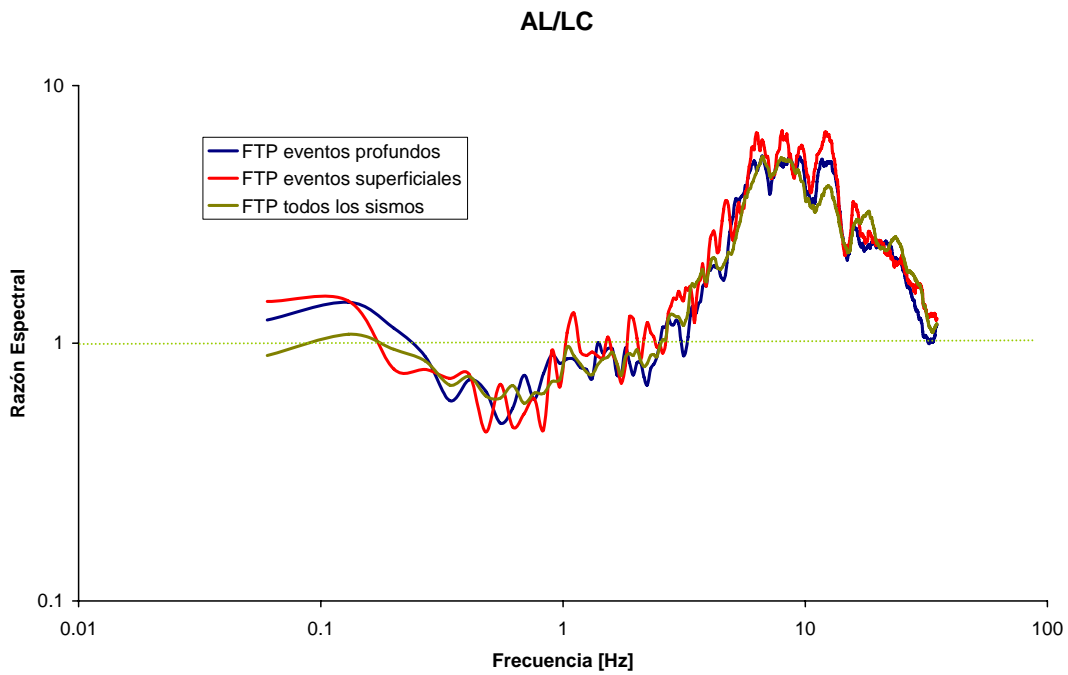


Figura II.10 Comparación de las FTP (L) obtenidas por los dos métodos de cálculo

De la figura anterior se observa que las Funciones de Transferencia Promedio son parecidas entre si, ya que para el intervalo de frecuencia entre 7 y 12 [Hz] las tres presentan prácticamente los mismos factores pico de amplificación, mientras que la atenuación máxima se ubica entre 0.5 y 1 [Hz]. Es importante recalcar que en general existe una tendencia única de las FT para cada estación de registro sísmico.

CAPÍTULO III

ESTIMACIÓN DE ESPECTROS DE RESPUESTA

III. ESTIMACIÓN DE ESPECTROS DE RESPUESTA

Para poder definir lo que es un espectro de respuesta es necesario plantear algunas definiciones básicas.

Sistemas linealmente elásticos. Se dice que una estructura tiene un comportamiento elástico lineal si la relación esfuerzo-deformación es como el de la figura III.1.

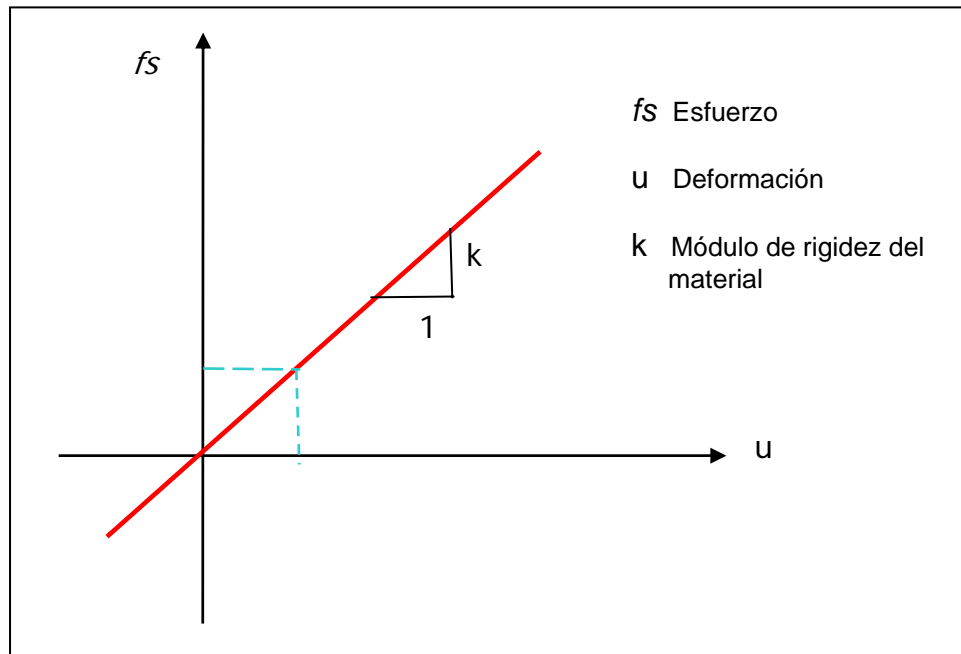


Figura III.1 Comportamiento elástico lineal

Sistemas de un grado de libertad. Si se considera la figura III.2, la cual está integrada por una masa concentrada (m), un marco que proporciona rigidez al sistema y un amortiguador viscoso que disipa la energía vibratoria, en el que además si la posición de la masa, una vez que ha sido desplazada, está definida por una sola coordenada se dice que dicho sistema tiene un solo grado de libertad.

Si un sistema elástico estáticamente cargado, es movido de alguna manera de su posición original de equilibrio, las fuerzas y momentos internos ya no estarán en balance con las cargas externas y empezaran a ocurrir vibraciones.

En general, un sistema elástico puede presentar diferentes modos de vibrar. En el mas simple de los casos la configuración de un sistema de vibración en cualquier instante puede especificarse con una sola coordenada; a tales casos se les llama *sistemas de un grado de libertad* (ref. 21).

En el caso de un sistema de un grado de libertad, cada una de sus propiedades se asume que se encuentran concentradas en un solo elemento físico. La figura III.2 muestra un ejemplo para dos tipos de excitación: a) fuerza externa en la dirección lateral $p(t)$ y b) el movimiento sísmico inducido $u_g(t)$. Cada caso tiene asociados desplazamientos originados por la fuerza excitadora.

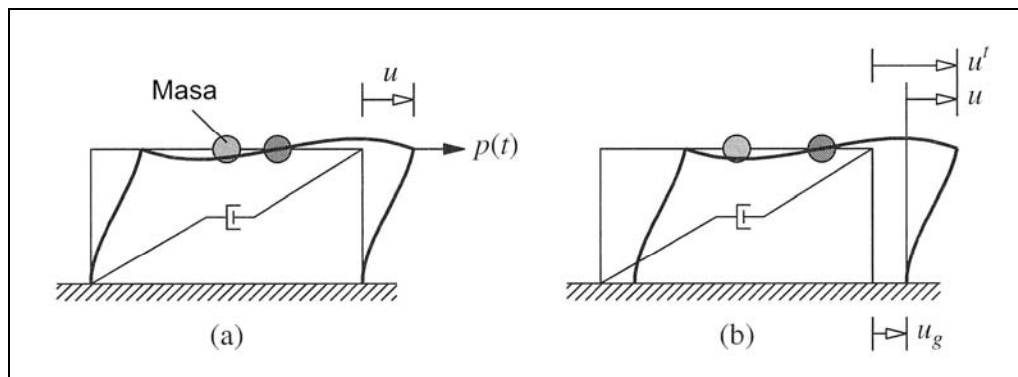


Figura III.2 Sistema de un grado de libertad.

Según el sistema planteado los desplazamientos en cada instante están relacionados por:

$$u'(t) = u(t) + u_g(t) \quad (3.1)$$

Donde:

$u'(t)$: Desplazamiento total del sistema en función del tiempo

$u(t)$: Desplazamiento generado por la deformación del marco en función del tiempo

$u_g(t)$: Desplazamiento originado por el movimiento sísmico en función del tiempo

Considerando el equilibrio dinámico del sistema de la figura III.2 b se tiene el diagrama de cuerpo libre mostrado en la figura III.3:

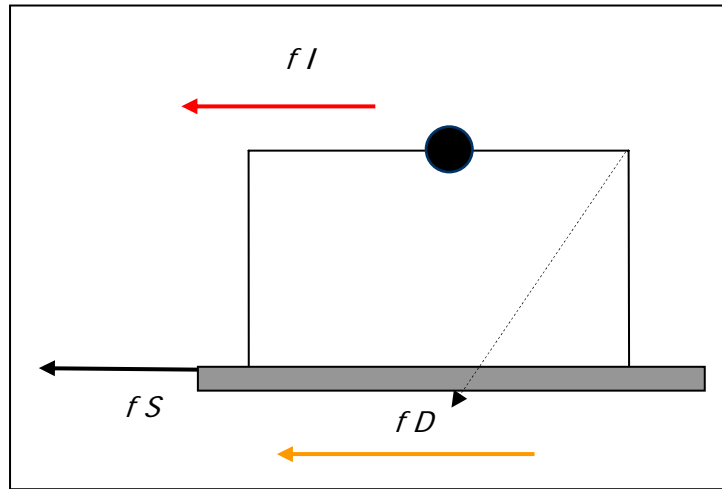


Figura III.3 Diagrama de cuerpo libre del sistema

Con base en lo anterior se tiene:

$$f_I + f_D + f_S = 0 \tag{3.2}$$

Donde:

$f_I \rightarrow$ Fuerza de Inercia

$f_D \rightarrow$ Fuerza de Amortiguamiento

$f_S \rightarrow$ Fuerza de Rigidez o Resistente

Ahora bien:

$$f_I = m\ddot{u}$$

$$f_D = c\dot{u}$$

$$f_S = ku$$

Donde:

m = masa del sistema

\ddot{u} = aceleración total del Sistema

c = coeficiente de amortiguamiento viscoso

\dot{u} = velocidad

k = rigidez lateral

u = desplazamiento

Reescribiendo la ecuación 3.2:

$$m\ddot{u}^t + c\dot{u} + ku = 0 \quad (3.3)$$

Pero :

$$u^t = u + u_g$$

derivando

$$\dot{u}^t = \dot{u} + \dot{u}_g$$

derivando

$$u^t = u + u_g$$

\therefore

$$m(\ddot{u} + \ddot{u}_g) + c\dot{u} + ku = 0$$

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \quad (3.4)$$

Finalmente la expresión 3.4 se conoce como, ecuación de movimiento para un sistema de un grado de libertad o ecuación de equilibrio dinámico. Si tal ecuación es dividida por m se tiene:

$$\frac{m\ddot{u}}{m} + \frac{c}{m}\dot{u} + \frac{k}{m}u = -\frac{m\ddot{u}_g}{m}$$

$$\ddot{u} + \frac{c}{m}\dot{u} + \frac{k}{m}u = -\ddot{u}_g$$

Considerando las siguientes definiciones:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n}$$

$$\zeta = \frac{c}{cr} = \frac{c}{2m\omega_n}$$

ω_n = frecuencia circular natural de vibración

k = rigidez lateral del sistema

m = masa del sistema

T_n = período natural de vibración

ζ = relación de amortiguamiento o fracción de amortiguamiento crítico

c = coeficiente de amortiguamiento viscoso

c_c = coeficiente crítico de amortiguamiento, es denominado de esta forma porque es el valor mínimo de c que impide que el sistema oscile al regresar a su posición original después de haber sufrido un desplazamiento.

Sustituyendo en la ecuación 3.4:

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2 u = -\ddot{u}_g(t) \quad (3.5)$$

De la ecuación 3.5 se deduce que el desplazamiento $u(t)$ del sistema es función de la frecuencia natural ω_n , y de la relación de amortiguamiento ζ . Por lo que dos sistemas que tengan los mismos valores de T_n y ζ tendrán la misma respuesta al desplazamiento $u(t)$ aún cuando uno de ellos tenga mayor masa o posea mayor rigidez que el otro. La solución de la ecuación 3.5 se incluye en el Apéndice I.

La figura III.4 presenta en su región izquierda la respuesta al desplazamiento de 3 sistemas con distintos periodos naturales de vibración y un valor de $\zeta=0.02$. Es evidente la diferencia en la respuesta, entre mas grande es el período de vibración mayor es el desplazamiento. En la misma figura, se ha fijado el período de vibración $T_n= 2$ segundos y se ha variado la relación de amortiguamiento ζ , de tal forma que las diferencias en la respuesta de los 3 sistemas están asociadas únicamente a un parámetro. Se observa que entre mayor sea el amortiguamiento la respuesta de los sistemas es menor.

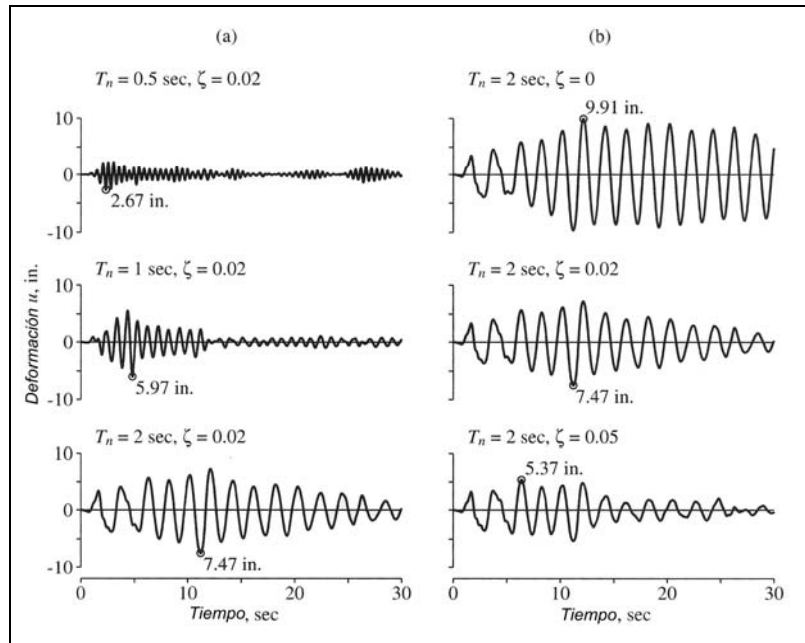


Figura III.4 Respuesta al desplazamiento de sistemas lineales de un grado de libertad (ref. 22)

Espectro de respuesta. El concepto de Espectro de Respuesta (ER) surge como una necesidad para caracterizar los movimientos del terreno, bajo la acción sísmica, y su efecto en las estructuras, de hecho es un medio para representar la respuesta máxima de todos los posibles sistemas de un grado de libertad para un movimiento particular del terreno. Por lo que puede ser definido como una gráfica que integra los valores pico de la respuesta a una excitación y que están en función del período natural de vibración del sistema para una relación de amortiguamiento determinada.

Procedimiento para calcular un espectro de respuesta de deformación. A continuación se describe brevemente una metodología de cálculo:

- Dado un movimiento del terreno, producido por un sismo, en la base de un sistema lineal de un grado de libertad, determinense las respuestas de desplazamiento para diferentes periodos y un valor de amortiguamiento fijo. Para ello es necesario resolver la ecuación de equilibrio dinámico.
- Para cada sistema obténgase el valor máximo del desplazamiento $D=u_o$.

- El valor D obtenido para cada sistema de un grado de libertad representa un punto de espectro de respuesta de desplazamiento.

La figura III.5 muestra de manera esquemática la obtención de un espectro de respuesta de desplazamiento.

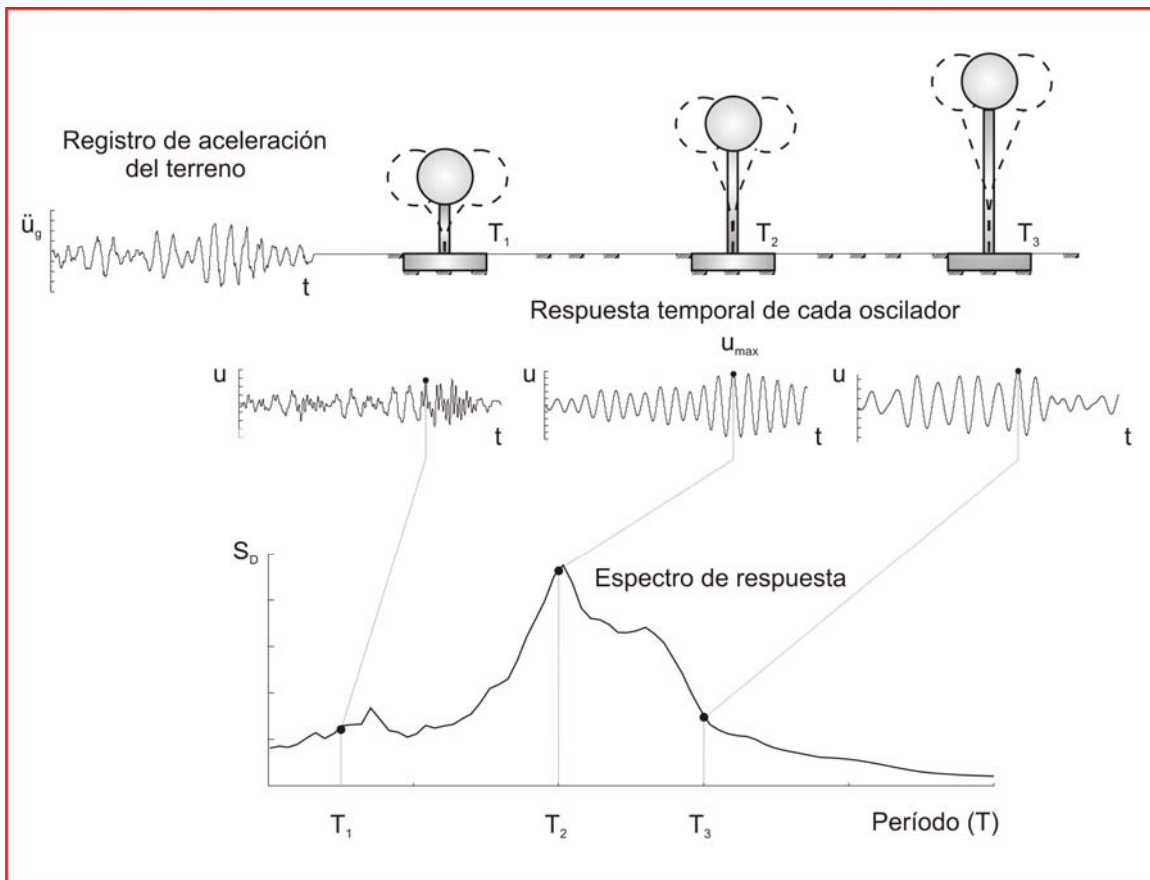


Figura III.5 Espectro de Respuesta elástico

De la figura III.4 se aprecia lo siguiente:

- Registro de aceleración del terreno
- Respuestas de desplazamiento $u(t)$ para diferentes periodos T_n y un valor dado de amortiguamiento ζ . Obtenidas mediante la solución de la ecuación diferencial de movimiento.
- Finalmente con las respuestas máximas de desplazamiento es posible construir el espectro de respuesta.

Básicamente el espectro de respuesta de desplazamiento $u(t)$ es el único necesario para calcular las fuerzas internas y por consiguiente los valores máximos $D=u_o$. Los llamados pseudo-espectros de velocidad y aceleración son útiles para el estudio de la respuesta misma, la construcción de espectros de diseño, etc.

El espectro de respuesta de pseudo-velocidad V para un sistema de un grado de libertad con frecuencia natural ω_n y con un desplazamiento $D=u_o$ producido por un movimiento sísmico del terreno está dado por:

$$V = \omega_n D = \frac{2\pi}{T_n} D \quad (3.6)$$

V tiene unidades de velocidad y está relacionado con el valor máximo de la energía de deformación E_{So} almacenada en el sistema durante un temblor mediante:

$$E_{So} = \frac{mV^2}{2} \quad (3.7)$$

De lo anterior se puede definir al espectro de respuesta de pseudo-velocidad como una gráfica que relaciona el producto $\omega_n D$ como una función del período natural del sistema T_n .

El espectro de respuesta de pseudo-aceleración se puede considerar como una cantidad A para un sistema de un grado de libertad con frecuencia natural ω_n relacionada con su desplazamiento máximo $D=u_o$ debido a un movimiento sísmico del terreno.

$$A = \omega_n^2 D = \left(\frac{2\pi}{T_n} \right)^2 D \quad (3.8)$$

A : tiene unidades de aceleración y está relacionada al valor cortante máximo en la base V_{b0}

$$V_{b0} = f_{s0} = mA$$

ó

$$V_{b0} = \frac{A}{g}W = CW$$

W = peso de la estructura

g = aceleración de la gravedad

$$C = \frac{A}{g} = \text{Coeficiente de fuerza cortante}$$

Según lo mencionado se puede considerar al espectro de respuesta de pseudo-aceleración como una gráfica de $\omega_n^2 D$ en función del período natural del sistema T_n . La figura III.6 presenta los tres tipos de espectros antes descritos.

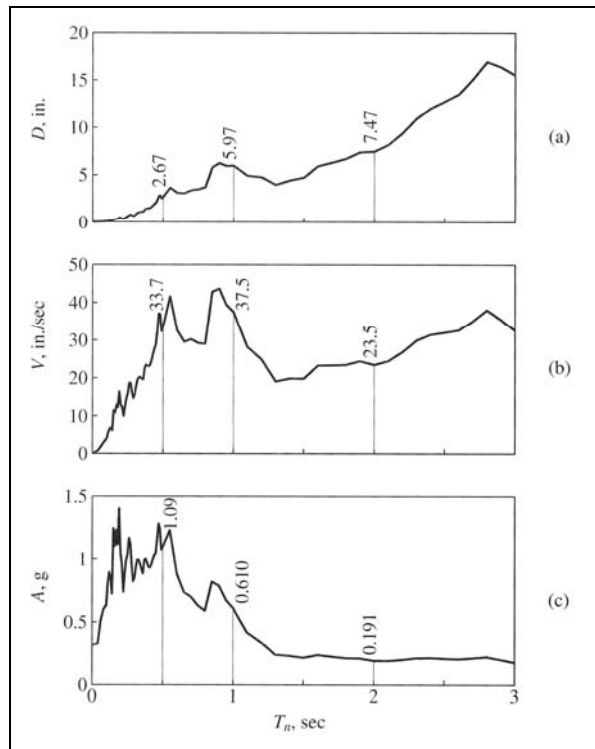


Figura III.6 a) ER de desplazamiento
 b) ER de pseudo-velocidad
 c) ER de pseudo-aceleración (ref. 23)

III.1 Teoría de Vibraciones Aleatorias (TVA)

Un sistema está vibrando si se encuentra agitando, o temblando, o de alguna manera moviendo de un lado a otro. Si este movimiento, es impredecible, se dice que el sistema se encuentra en *vibración aleatoria*. Por ejemplo, el movimiento de una hoja que ondea a merced del viento es impredecible, por lo tanto se encuentra sometida a una excitación aleatoria, consistente en los cambios de dirección e intensidad del viento, y el resultado es que se mueve de un lado a otro sufriendo una vibración casual. Pero la velocidad y amplitud del movimiento del cuerpo no dependen solamente de la intensidad de la excitación provocada por el viento, sino también de la masa, la rigidez y el amortiguamiento inherentes al sistema constituido por la hoja. El estudio de las vibraciones aleatorias consiste en averiguar de que forma las características estadísticas (o promediadas) del movimiento de un sistema aleatoriamente excitado dependen de las características estadísticas de la excitación y de las propiedades dinámicas del sistema vibrante. En la figura 7 se muestra parte de una posible “historia” temporal de un sistema sometido a una vibración aleatoria. Se ha presentado en función del tiempo t , el desplazamiento x referido a un origen arbitrario. Dado que el movimiento es aleatorio, no se puede predecir el valor exacto de x para un cierto instante dado (ref. 24).

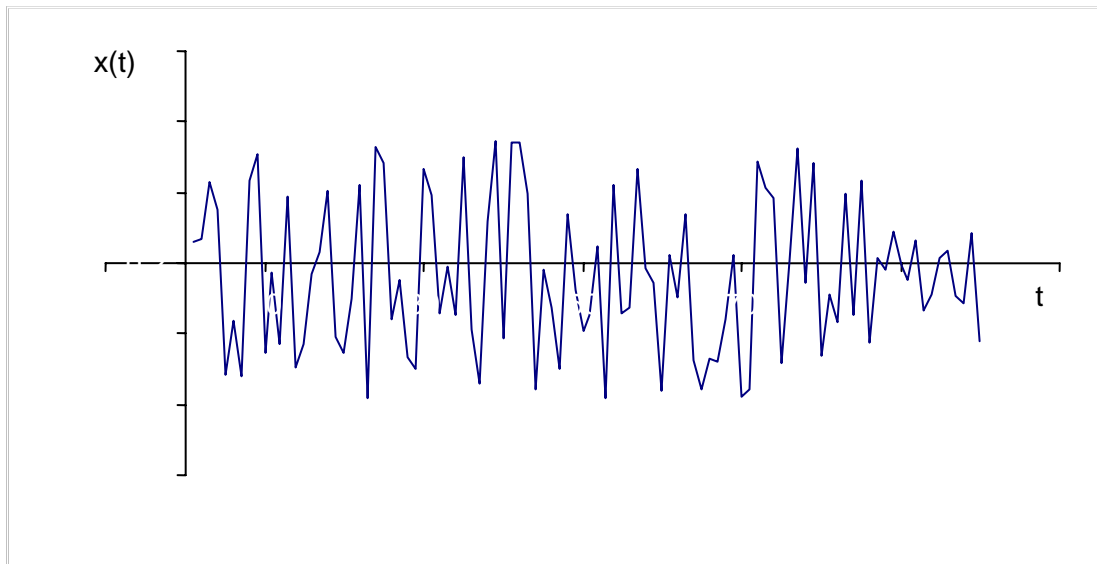


Figura III.7 Posible historia temporal de un sistema sometido a vibración aleatoria

Como mucho, se puede hallar la probabilidad de que x se encuentre entre ciertos límites para ese un valor de tiempo t . El tema de las probabilidades se encuentra, pues, en el seno de la teoría de las vibraciones aleatorias.

Análisis de la TVA. En 1956 Cartwright y Longuett-Higgins (ref. 25) obtuvieron la distribución de probabilidades del máximo de una función aleatoria, generando un algoritmo que fue utilizado en el cálculo de la amplitud máxima esperada de las ondas marinas. Es así como surge la TVA que es el fundamento de este trabajo.

Años después, Vanmarke (ref. 26) y Boore (ref. 27) aplicaron estos conceptos en problemas propios de la ingeniería sísmica al considerar que el movimiento provocado por temblores puede modelarse como un proceso estocástico, estacionario (Papoulis, ref. 28) y ergódico. Se dice que un proceso estocástico es estacionario si sus propiedades estadísticas son invariantes en el tiempo, y ergódico si estas propiedades pueden ser determinadas a partir de una sola de sus realizaciones considerando promedios apropiados en el tiempo (ref. 29).

A pesar que algunos acelerogramas son procesos que no cumplen rigurosamente con estas suposiciones, empíricamente se han obtenido buenos resultados al aplicar la TVA en la estimación de los espectros de respuesta con la ayuda de programas realizados en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (ref. 30).

Según la teoría de vibraciones aleatorias el Espectro de Respuesta Estimado (ERE) estará dado por:

$$E(A_{m\acute{a}x}) = a_{cm} \cdot Fp \quad (3.9)$$

Donde $A_{m\acute{a}x}$ es la pseudoaceleración máxima, $E(.)$ denota esperanza matemática, a_{cm} es la aceleración cuadrática media y Fp es un factor pico.

Para obtener a_{cm} se recurre al teorema de Parserval (ref. 31) del cual bajo las hipótesis señaladas se deduce que:

$$a_{cm} = \sqrt{\frac{M_0}{T_{cm}}} \quad (3.10)$$

en donde T_{cm} es la duración de la señal y

$$M_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [Y(\omega)]^2 d\omega \quad (3.11)$$

En la ecuación 3.11, $Y(\omega)$ es la transformada de Fourier de la señal cuyo máximo desea estimarse. Sea $a(t)$ el acelerograma producido por un sismo en alguna estación y $A(\omega)$ su correspondiente transformada de Fourier. Ahora bien para obtener el espectro de Fourier en cualquier otra estación en la cual no existe registro se requiere un historial de efectos de sitio generado por el cociente espectral entre la estación que desea estimarse y la estación de la que se conoce el registro sísmico, a dicho historial se le denomina Función de Transferencia Promedio FTP y en la TVA se denota por $H(\omega)$. Por lo tanto $Y(\omega)$ esta dada por

$$Y(\omega) = A(\omega) \cdot H(\omega) \quad (3.12)$$

Para obtener T_{cm} Boore (ref. 32) propone un resultado empírico calibrado para los sismos ocurridos en California:

$$T_{cm} = T_s + \left[\frac{1}{\frac{2\pi\zeta}{T_0}} \right] \cdot \left[\frac{\left(\frac{T_s}{T_0} \right)^3}{\left(\frac{T_s}{T_0} \right)^3 + \frac{1}{3}} \right] \quad (3.13)$$

Donde ζ es el amortiguamiento crítico y T_0 es el período natural del oscilador elemental de un grado de libertad y T_s es la duración de la fase intensa del movimiento, para propósitos de este trabajo se siguió el criterio de Arias para determinarla (ref. 33).

Para obtener el factor pico Fp , se define a N como el número de cruces de la señal por el eje del tiempo y se estima mediante la siguiente expresión:

$$N = \frac{T_s}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{M_2}{M_0}} \quad (3.14)$$

de donde:

$$M_2 = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 [Y(\omega)]^2 d\omega \quad (3.15)$$

De acuerdo con la TVA (ref. 34), el valor de Fp esta dado por:

$$Fp = \sqrt{2 \ln N} + \frac{\gamma}{\sqrt{2 \ln N}} \quad (3.16)$$

donde γ es la constante de Euler, ($\gamma = 0.577\dots$)

Finalmente con las expresiones 3.9 a 3.16 es posible estimar espectros de respuesta de señales registradas así como de eventos en los cuales sólo se conoce el registro en una estación pero se cuenta con funciones de transferencia empíricas.

III.2 Cálculo de Espectros de Respuesta

Con base en la Teoría de Vibraciones Aleatorias se estimaron los espectros de respuesta en la ciudad de Oaxaca, para ello se utilizó el programa llamado VIBEFs (ref. 35). Al final de este trabajo (Apéndice II) se describe en forma detallada el uso del mismo.

El *software* antes mencionado, es una herramienta para obtener Espectros de Respuesta Estimados (ERE) en sitios en donde por algún motivo se perdió la oportunidad de tener un acelerograma y ahora se quiere conocer cual hubiera sido su Espectro de Respuesta (ER). Para ello es necesario contar con una base de acelerogramas registrados simultáneamente al menos en dos estaciones. Posteriormente es necesario calcular las FT para las mismas utilizando todos los registros comunes. Finalmente, se obtiene una FT promedio para cada componente, misma que será la entrada al sistema VIBEFs, el cual entregará como salida el ERE que se requiere.

De la tabla 5 del capítulo II, se observa que durante el sismo del 15 de junio de 1999 (sismo 13), sólo existe registro en las estaciones OXFM y OXLC y se requiere conocer el ER en las otras cinco estaciones de la red (OXAL, OXBJ, OXCU, OXPM y OXTO) ya que para esa fecha aún no se habían instalado tales estaciones. Ahora bien, para ello se cuenta con un historial de otros sismos para cada uno de los cinco sitios de registro, por lo tanto es posible obtener Funciones de Transferencia respecto a la estación OXLC y a partir de ellas generar una FTP para cada estación. De tal forma que se tienen FTP de: OXAL/OXLC, OXBJ/OXLC, OXCU/OXLC, OXPM/OXLC y OXTO/OXLC.

Utilizando las FTP generadas por ambos métodos de cálculo y el programa VIBEFs se obtuvo para cada estación el ERE para el sismo 13 dando como dato de entrada el acelerograma de la estación con la que se cuenta con el registro, en este caso la estación OXLC y la FTP correspondiente.

Por ejemplo para el ERE en la estación OXAL se da como dato de entrada el registro acelerográfico de la estación Las Canteras (OXLC) y la FTP de OXAL/OXLC dando como salida el ERE en OXAL.

En el capítulo II se mencionó que para obtener la FTP previamente se realizó la localización epicentral del conjunto de sismos registrados, los cuales se seleccionaron de acuerdo a su posición geográfica y a la profundidad focal en sismos superficiales y profundos. Una vez hecha la agrupación se realizó un cálculo de FTP para los sismos superficiales y otra para profundos, finalmente un cálculo de FTP utilizando todos los sismos sin considerar ninguna clasificación. Para el ejemplo que se presenta se tomaron los dos tipos de promedios de las FT para estimar los ER.

En la figura III.11 se muestran los ERE en las estaciones OXAL, OXBJ, OXCU, OXFM, OXPM y OXTO para el sismo del 15 de junio de 1999 ($M=7.0$) para las componentes L, T y V, considerando la FTP superficial obtenida con el primer método de cálculo ya que tal evento cae en esa clasificación (tabla 6). La figura III.12 muestra los ERE considerando el segundo método.

Para poder definir cual de los dos procedimientos de cálculo arroja mejores resultados se realizó una comparación con el ER real del sismo 13 en la estación OXFM (Facultad de medicina) debido a que se cuenta con el registro sísmico para tal evento (tabla 5). En la figura III.13 se muestran los dos ER obtenidos comparados con el ER real. El ER1 representa los resultados utilizando la clasificación (método 1) y el ER2 considerando todos los eventos (método 2).

Finalmente la figura III.14 presenta los ERE (método 1) para el sismo del 30 de septiembre de 1999 ($M=7.5$), a su vez la figura III.15 muestra los resultados obtenidos aplicando nuevamente el segundo método.

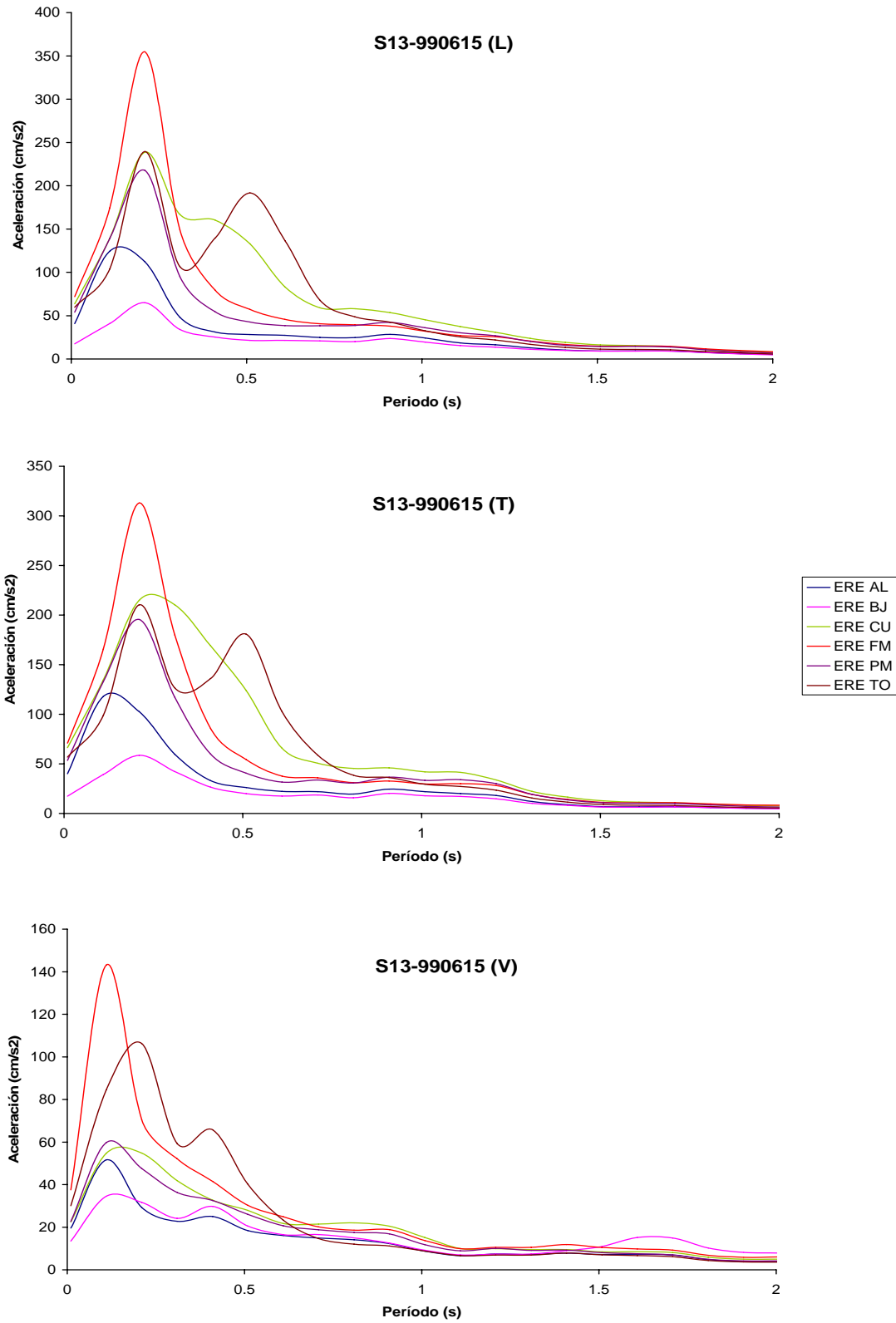


Figura III.11 Espectros de Respuesta Estimados con el primer método de cálculo

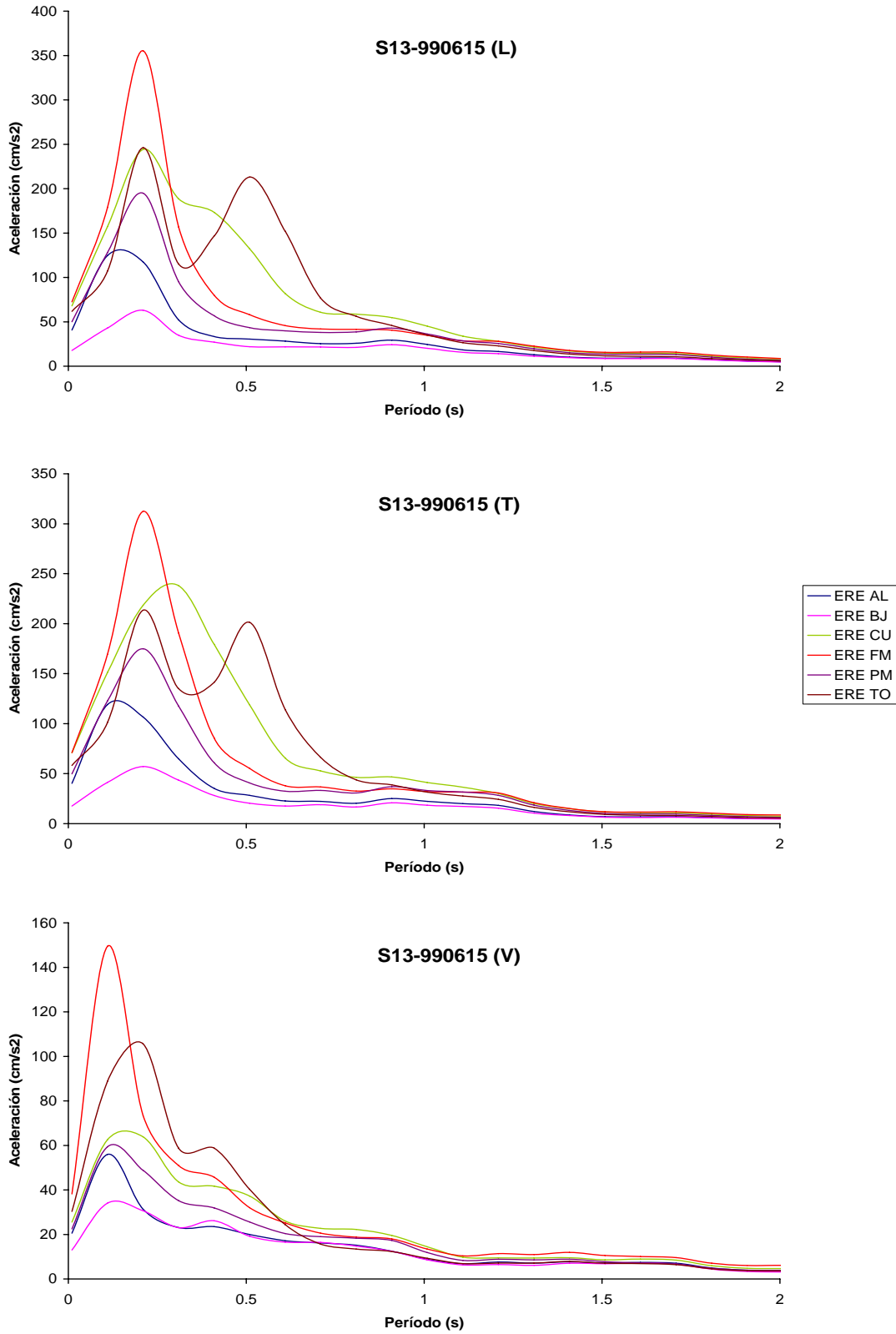


Figura III.12 Espectros de Respuesta Estimados con el segundo método de cálculo

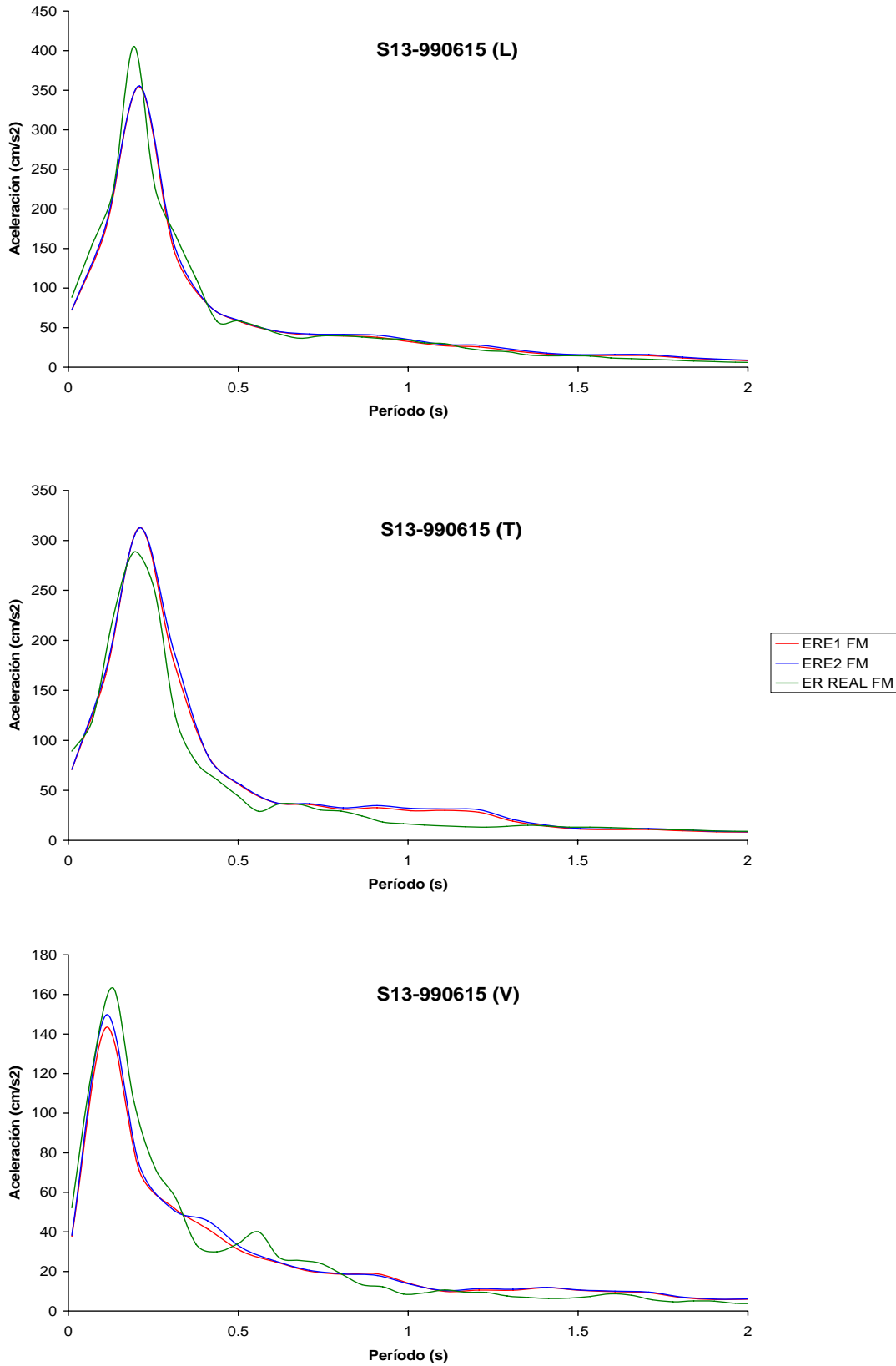


Figura III.13 Comparación de ER estimados con el ER real

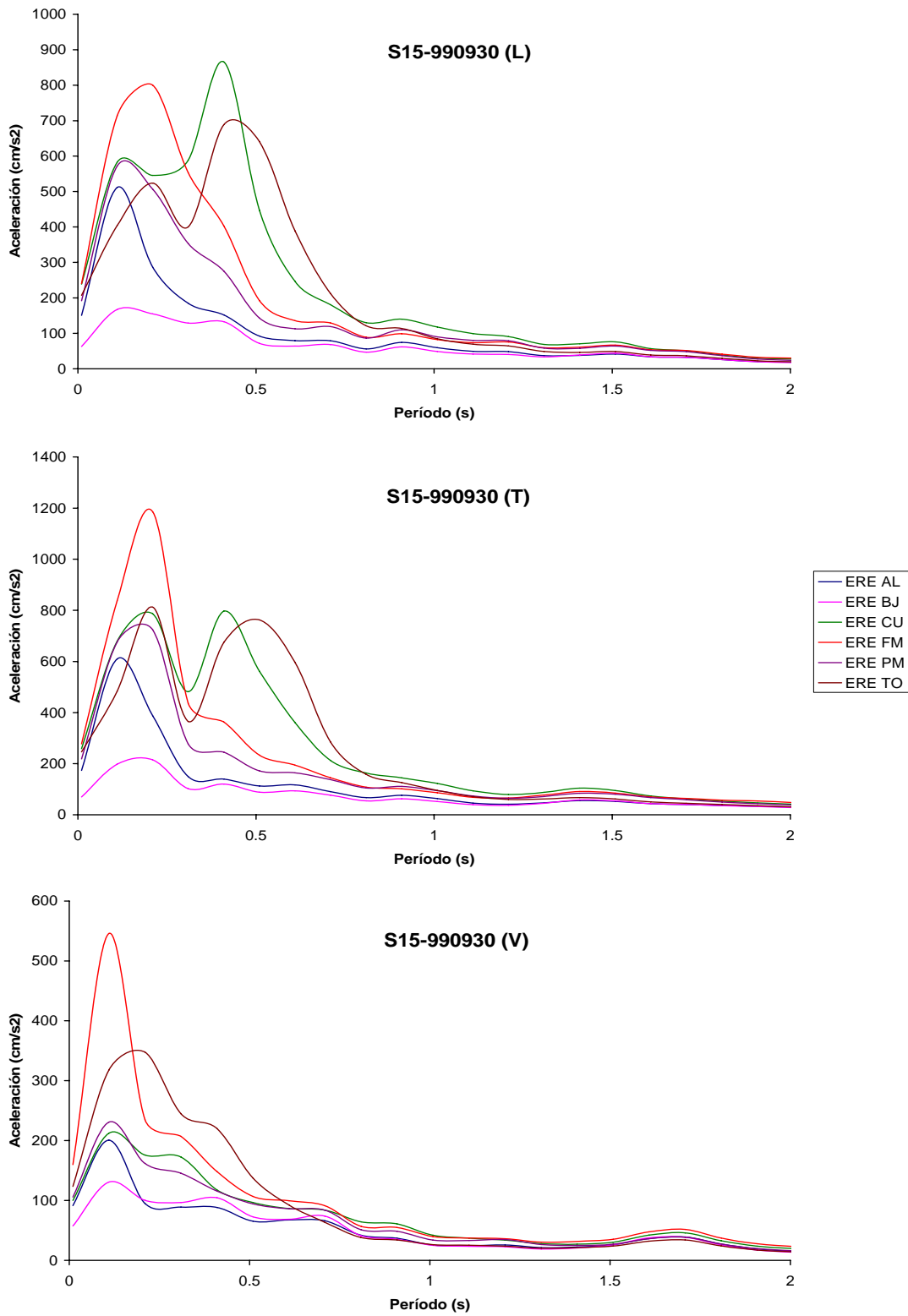


Figura III.14 Espectros de Respuesta Estimados con el primer método de cálculo

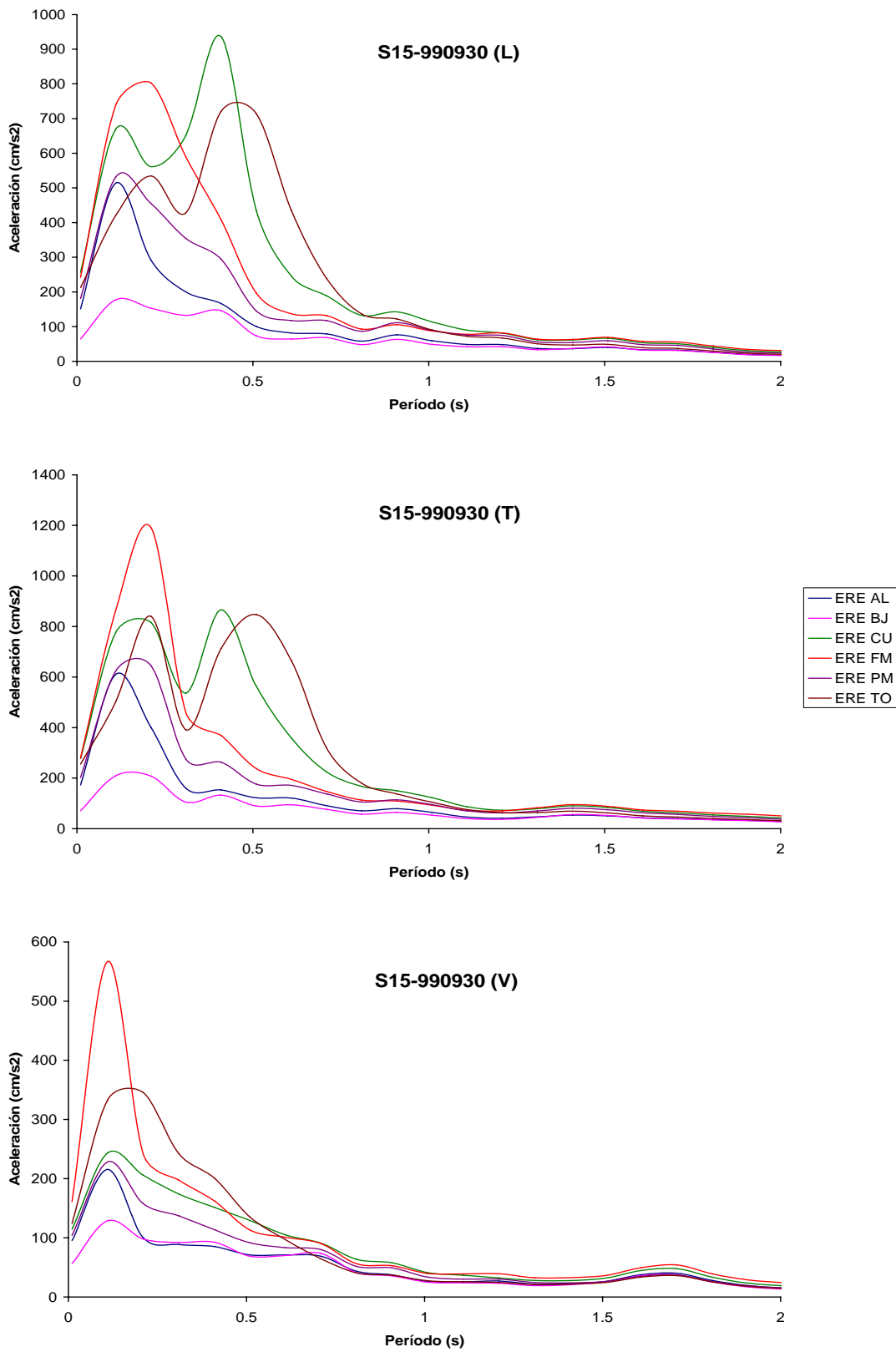


Figura III.15 Espectros de Respuesta Estimados con el segundo método de cálculo

Análisis de Resultados

La figura III.11 presenta los resultados obtenidos al aplicar la TVA en la estimación de los Espectros de Respuesta para el sismo del 15 de junio de 1999 en las estaciones de la RACO, considerando el primer método de cálculo. De la componente L se observa que la ordenada espectral máxima alcanza 350 gal en la estación Facultad de Medicina, mientras que la más baja pertenece a primaria Benito Juárez con 58 gal. En general las estaciones presentan la misma tendencia en cuanto a su forma, ya que tienen su pico en un período aproximado $T=0.2$ s, sin embargo la estación Tecnológico Oaxaca tiene otro máximo en $T=0.51$ s con una ordenada de 192 gal, además en Alameda de León su ER se encuentra desplazado un poco hacia la izquierda ya que su máximo está en un período $T=0.11$ s con 125 gal.

Para la componente T la ordenada espectral máxima al igual que en L pertenece a FM, pero con una aceleración menor de 313 gal. Se conservan las tendencias mencionadas para la componente anterior, ya que TO continua presentando dos máximos y BJ al igual tiene un valor espectral de 58 gal. La estación AL a diferencia de las otras tiene su máximo en $T=0.11$ s. Para esta componente es importante mencionar que la estación CU tiene una ventana espectral mayor que en la componente L.

Finalmente, para la misma figura componente V se observa que tiene la aceleración máxima FM de 143 gal, siendo esta la menor para las tres componentes de registro. Para las demás estaciones a excepción de TO tienen sus picos en $T=0.11$ s y resultan más uniformes en cuanto a sus tendencias. Respecto a TO se nota que su primer pico está en $T=0.11$ s y existe otro máximo no tan marcado como en los dos casos anteriores y se localiza en $T=0.41$ s con sólo 65 gal.

Los resultados obtenidos al aplicar el segundo método de cálculo para el evento del 15 de junio del 99 se observan en la figura III.12. La componente L tiene un máximo de 355 gal para FM y un mínimo espectral de 63 gal para la estación BJ. Para las estaciones FM, CU, TO, PM y BJ sus ordenadas pico se encuentran en $T=0.21$ s, sin embargo en AL su máximo se localiza en $T=0.15$ s. La estación TO adicionalmente tiene un segundo máximo en $T=0.51$ s el cual alcanza 213 gal, este ligeramente menor al primero de 246 gal. La ventana espectral mayor pertenece a CU, ya que a diferencia de las demás estaciones rebasa el $T=0.5$ s.

De la componente T se destaca lo siguiente: la ordenada espectral máxima es de 312 gal en FM, la menor de 57 gal en BJ, en general se conservan las proporciones observadas en la componente L. Con relación a la componente V y a diferencia de las dos anteriores se recorren los máximos de los espectros a $T= 0.11$ s y FM alcanza nuevamente la mayor ordenada con 149 gal y BJ tiene el valor mas bajo con 21 gal. La estación TO para esta componente no presenta un segundo pico. También es importante destacar que CU en los casos anteriores era la segunda estación en tener un máximo importante y que ahora se reduce hasta 68 gal muy por debajo de FM.

De las dos figuras analizadas anteriormente se concluye que el suelo con menor respuesta es donde está ubicada la estación Benito Juárez, mientras que los valores de máxima respuesta corresponden a la estación FM. Ordenando las estaciones con base a las ordenadas espectrales máximas de mayor a menor, se tiene: OXBJ, OXAL, OXPM, OXTO, OXCU y OXFM.

La figura III.13 presenta la comparación entre los dos métodos de cálculo con el Espectro de Respuesta Real, en donde la componente L tiene una ordenada espectral, para el ER real, de 400 gal, la cual resulta en un 12 por ciento mayor a las estimadas con la TVA. Los resultados de los métodos de cálculo son muy semejantes entre si como se aprecia.

La componente T presenta las mismas características, ya que el ER1 y ER2 son nuevamente muy similares superando en un 8 por ciento al ER real. Finalmente, la componente V del ER real tiene un máximo de 163 gal superior en 8.5 por ciento respecto al ER2. Los tres ER coinciden en cuanto al período en el que se localiza su pico en $T=0.11$ s. No es de sorprender que los ER estimados sean muy parecidos, debido que las FTP que son la base para el cálculo con la TVA son muy similares.

Del análisis anterior, se concluye que los resultados obtenidos son satisfactorios ya que al efectuarse la comparación no existen errores superiores al 13 por ciento, por lo tanto la Teoría de Vibraciones Aleatorias ofrece una alternativa confiable en la estimación de ER, sobre todo en estaciones en donde no existe registro sísmico, pero que se cuenta con un historial de eventos suficientes para generar funciones de transferencia empíricas.

Con relación a los ER estimados para el evento del 30 de septiembre de 1999 ($M=7.5$), se puede señalar que los resultados son muy similares a los discutidos anteriormente, salvo que ahora las amplitudes máximas de las ordenadas espectrales son mayores debido a la mayor magnitud del sismo.

CONCLUSIONES

Y

RECOMENDACIONES

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La Teoría de Vibraciones Aleatorias ofrece un método elegante y eficiente para estimar Espectros de Respuesta en sitios donde no se tiene registro sísmico, pero que se cuenta con un importante banco de datos que permita estimar funciones de transferencia empíricas, definidas como el cociente de los espectros de Fourier en dos sitios.

Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo al hacer uso de la TVA se proponen dos métodos de cálculo; el primero utiliza la clasificación de los eventos según su origen (profundos y superficiales) mientras que el segundo considera todos los eventos. La comparación anterior permite concluir que, en estos casos, el origen del evento no tiene relevancia en los ER generados ya que ambos cálculos arrojan resultados semejantes. Sin embargo se recomienda utilizar las FTP que toman en cuenta la clasificación ya que en algún evento que se desea estimar, el origen del sismo pudiera tener influencia en el resultado esperado. Aunque en los cálculos efectuados en este trabajo no existe diferencia en emplear uno u otro método, no se descarta la posibilidad de que se puedan presentar diferencias con sismos de diferentes provincias tectónicas.

El nivel de precisión con que pueden estimarse los Espectros de Respuesta a partir de un acelerograma y una Función de Transferencia Promedio sugiere la posibilidad de utilizar la Teoría de Vibraciones Aleatorias como una alternativa para conocer ER en sitios donde no se posee un registro determinado, sobre todo para eventos sísmicos importantes.

La Estimación de los Espectros de Respuesta son una herramienta importante en la ingeniería sísmica ya que estos permiten conocer la respuesta elástica máxima para un sistema de un grado de libertad en cualquier sitio de registro acelerográfico, ya que estos pueden ser una importante fuente de datos para mejorar los reglamentos de construcciones y, por ende reducir el peligro sísmico.

APÉNDICES

APÉNDICE I

Solución a la ecuación diferencial de movimiento. Un acelerograma no es una función algebraica del tiempo, sino una serie de valores numéricos de la aceleración para diferentes instantes; usualmente a intervalos constantes de tiempo Δt , que varían entre 0.005 y 0.02 segundos. Para duraciones normales de temblores, entre 20 y 60 segundos, se tienen unos pocos millares de valores de aceleración. La figura A.1 muestra el acelerograma registrado en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de la ciudad de México, durante el temblor del 19 de septiembre de 1985 (M=8.1) componente EW. Los valores máximos de aceleración, velocidad y desplazamiento que se obtuvieron integrando sucesivamente dicho acelerograma son 168 cm/s^2 , 60.5 cm/s y 22 cm , respectivamente.

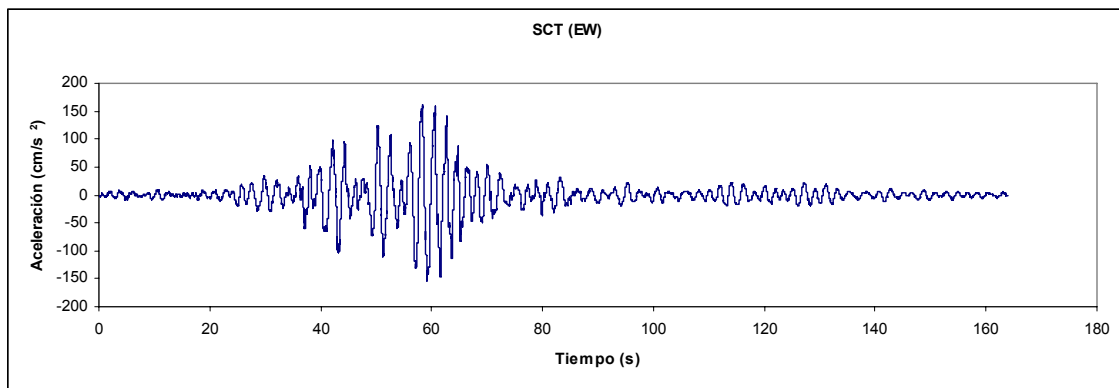


Figura A.1 Registro obtenido en la estación SCT (19/09/1985)

Dada la manera en la que se expresan los acelerogramas, en vez de calcular algebraicamente la ecuación de equilibrio dinámico es conveniente resolverla numéricamente. En esta sección se presenta el método propuesto por Newmark (1962) para sistemas de un grado de libertad.

Método β de Newmark. Considerando un sistema de un grado de libertad como el mostrado en la figura A.2 y cuya ecuación de movimiento es:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t)$$

La cual se puede escribir como:

$$ma + cv + ku = -m\ddot{s}$$

donde a , v y u son la aceleración, velocidad y desplazamiento, respectivamente, de la masa m .

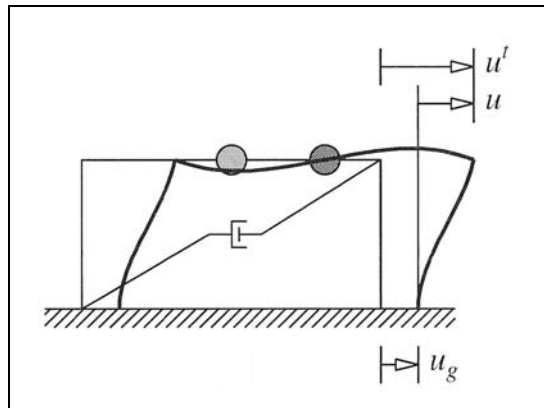


Figura A.2 Sistema de un grado de libertad (ref. 36)

Suponiendo que estas tres cantidades se conocen en el instante t y si se utiliza el subíndice 1 para denotar sus valores en $t + \Delta t$. Se debe también cumplir que:

$$ma_1 + cv_1 + ku_1 = -m\ddot{s}_1$$

Definiendo $\Delta a = a_1 - a$, $\Delta v = v_1 - v$ y $\Delta u = u_1 - u$; y restando las dos últimas ecuaciones se deduce que:

$$m\Delta a + c\Delta v + k\Delta u = -m(\ddot{s}_1 - \ddot{s}) \quad (1)$$

Newmark propuso emplear las siguientes ecuaciones para calcular v_1 y u_1 :

$$v_1 = v + \frac{1}{2}(a + a_1)\Delta t \quad (2)$$

$$u_1 = u + v\Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \beta \right) a + \beta a_1 \right] (\Delta t)^2 \quad (3)$$

Utilizando conceptos básicos de cinemática se puede deducir como varía la aceleración con el tiempo en el lapso Δt . Por ejemplo, $\beta=1/4$ corresponde a aceleración constante en dicho lapso, igual al promedio de a y a_1 , mientras que una variación lineal de aceleraciones entre a y a_1 conduce a $\beta=1/6$. Ahora se tiene que resolver un sistema de tres ecuaciones simultáneas, (1), (2) y (3) con tres incógnitas.

En lo siguiente se considera $\beta=1/4$, aunque el procedimiento es similar para cualquier otro valor de β . La ecuación (3) se convierte en:

$$u_1 = u + v\Delta t + 1/4(a + a_1)(\Delta t)^2 \quad (4)$$

$$\Delta u = u_1 - u = v\Delta t + 1/4(a + a_1)(\Delta t)^2 \quad (5)$$

y de (2) se obtiene que:

$$\Delta v = v_1 - v = \frac{1}{2}(a + a_1)\Delta t \quad (6)$$

$$\therefore (a + a_1)\Delta t = 2\Delta v \quad (7)$$

substituyendo en (5) se llega a:

$$\Delta v = 2\left(\frac{\Delta u}{\Delta t} - v\right) \quad (8)$$

de (5) también se deduce que:

$$4 \cdot \left(\frac{\Delta u - v\Delta t}{\Delta t^2}\right) = a + a_1 = a_1 - a + 2a$$

$$\Delta a = 4 \cdot \left(\frac{\Delta u - v\Delta t}{\Delta t^2}\right) - 2a \quad (9)$$

Empleando las ecuaciones (8) y (9) para sustituir Δv y Δa en (1), Δu queda como la única incógnita que se despeja con el resultado siguiente:

$$\Delta u = \frac{-m(s_1 - s) + \left(\frac{4m}{\Delta t} + 2c\right)v + 2ma}{\frac{4m}{(\Delta t)^2} + \frac{2c}{\Delta t} + k} \quad (10)$$

Aplicando un cambio de variable, donde:

$$\Delta s^* = -m(s_1 - s) + \left(\frac{4m}{\Delta t} + 2c\right)v + 2ma \quad (11)$$

$$k^* = \frac{4m}{(\Delta t)^2} + \frac{2c}{\Delta t} + k \quad (12)$$

$$\Delta u = \frac{\Delta s^*}{k^*} \quad (13)$$

Muchos programas de computadora emplean el método de Newmark con $\beta=1/4$ debido a su sencillez y precisión y a que se aplica fácilmente a estructuras de múltiples grados de libertad, debido a que su autor demostró que con ese valor el método es incondicionalmente estable, es decir que no lleva a resultados espúreamente altos como consecuencia de las aproximaciones numéricas, independiente del valor de Δt .

Ejemplo de aplicación del Método de Newmark en la solución de la ecuación diferencial de movimiento

Considerando un sistema de un grado de libertad como el mostrado en la figura A.2 se requiere encontrar el Espectro de Respuesta de pseudo-aceleración para una relación de amortiguamiento ζ del 5% para el acelerograma registrado en SCT de la ciudad de México (figura A.1) durante el temblor del 19 de septiembre de 1985 componente EW.

Solución:

Para comenzar se toma en cuenta que, antes del temblor la masa está en reposo, es decir, que cuando $t=0$ tenemos $v=0$ y $u=0$. Como en la ecuación:

$$ma + cv + ku = -m\ddot{s}$$

se satisface en todo momento, en el primer paso el equilibrio dinámico requiere que:

$$a = -\ddot{s}$$

y por lo tanto ahora se conocen los tres valores iniciales de las tres incógnitas (v , u y a). Para ilustrar el método y apreciar su precisión, consideraremos que m asume un valor unitario y que el amortiguamiento es 5% del crítico.

Algoritmo de aplicación del método.

1. Calcular Δs^* con la ecuación (11)
2. Calcular k^* con la ecuación (12)
3. Efectuar el cociente según la ecuación (13)
4. Calcular Δu y Δa con la ecuación (8) y (9) respectivamente
5. Obtener a_1 , v_1 y u_1
6. Ahora a_1 , v_1 y u_1 son los valores iniciales de las variables de la ecuación (1).

Se muestra a continuación el cálculo para un período $T=2$ (s).

Como siguiente paso es necesario identificar las constantes de nuestro problema.

- $\zeta = 5\%$
- $m=1$

Con las siguientes relaciones se obtienen los valores faltantes para poder sustituir en la ecuación (10).

Considerando :

$$\zeta = 5\% = 0.05$$

$$Tn = 2(s)$$

$$m = 1$$

De :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$Tn = \frac{2\pi}{\omega_n}$$

$$\zeta = \frac{c}{cr} = \frac{c}{2m\omega_n}$$

Por lo tanto:

$$\omega_n = \pi$$

$$k = \pi^2$$

$$c = 0.1\pi$$

La tabla 1 muestra la solución para los primeros n segundos. Se presentan los resultados parciales obtenidos en los pasos 1-6 del algoritmo.

t (s)	Resultados Numéricos							
	u	v	a	s	Δs^*	Δu	Δv	Δa
0.00	0.0000	0.0000	0.0000	-1.0600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.01	0.0000	0.0000	0.0000	-1.0600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.02	0.0000	0.0000	0.0000	-1.0600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.03	0.0000	0.0000	0.0000	-1.0600	-0.9500	0.0000	-0.0047	-0.9483
0.04	0.0000	-0.0047	-0.9483	-0.1100	-3.7961	-0.0001	-0.0095	0.0039
0.05	-0.0001	-0.0142	-0.9444	-0.1100	-7.5795	-0.0002	-0.0094	0.0048
0.06	-0.0003	-0.0236	-0.9395	-0.1100	-10.3936	-0.0003	-0.0046	0.9540
0.07	-0.0006	-0.0282	0.0145	-1.0600	-11.2886	-0.0003	0.0002	0.0027
.
.
.
61.76	93.5237	50.9008	-871.9325	-67.1000	18645.5552	0.4653	-8.7429	-4.7156
61.77	93.9890	42.1579	-876.6481	-64.2300	15130.5896	0.3776	-8.8000	-6.7119
61.78	94.3665	33.3578	-883.3600	-58.4800	11595.4604	0.2894	-8.8435	-1.9876
.
.
.
163.79	-0.0456	8.9659	-0.3467	-2.0200	3591.3056	0.0896	-0.0079	-0.8820
163.80	0.0440	8.9580	-1.2288	-2.0200	3585.4257	0.0895	-0.0215	-1.8363
163.81	0.1335	8.9366	-3.0651	-1.0600	3575.0719	0.0892	-0.0302	0.0890
163.82	0.2227	8.9064	-2.9761	-2.0200	3562.1885	0.0889	-0.0341	-0.8666
163.83	0.3116	8.8723	-3.8427	-2.0200	3546.7962	0.0885	-0.0427	-0.8601
163.84	0.4001	8.8295	-4.7029	-2.0200	3527.9579	0.0880	-0.0513	-0.8528
163.85	0.4882	8.7782	-5.5556	-2.0200	3503.6831	0.0874	-0.0699	-2.8610

Tabla 1. Resultados parciales de la solución a la ecuación diferencial de movimiento por medio del Método β de Newmark para T=2

La figura A.3 muestra la solución a la ecuación diferencial de movimiento según el método de Newmark.

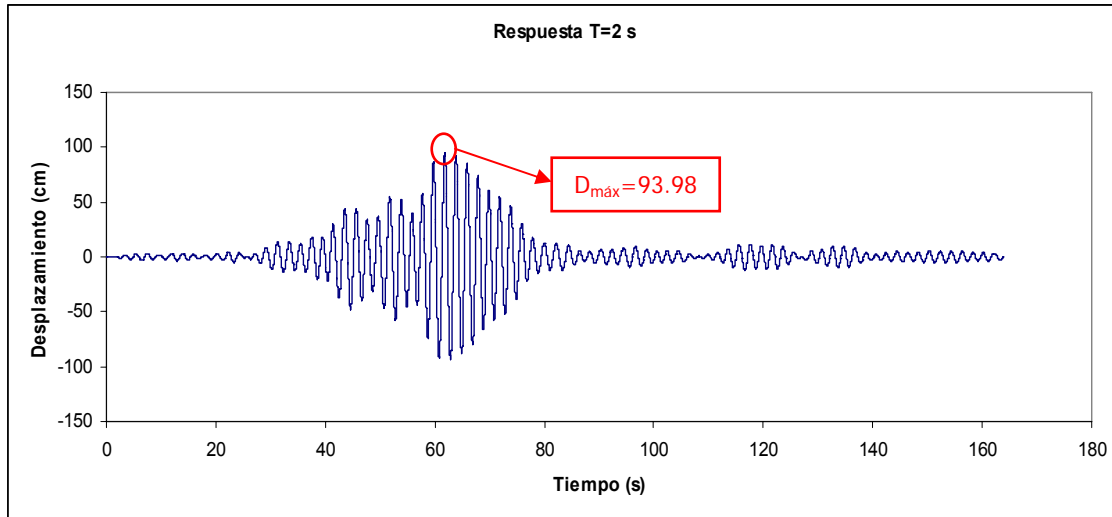


Figura A.3 Solución a la ecuación diferencial de movimiento para un período $T=2(s)$.

Ahora se localiza la respuesta máxima de la solución. De la figura A.3 se observa que $D_{\max}=93.98$ cm. Por lo tanto como lo que se busca es construir el ER de pseudos-aceleración se efectúa el producto $(D_{\max})(\omega_n)^2 = 927.54$ cm/s^2 y de esta manera se obtiene un punto del espectro de respuesta. Para obtener más puntos del ER es necesario realizar el mismo procedimiento para distintos periodos (T). La figura A.4 muestra el ER de pseudos-aceleración final (ref. 37).

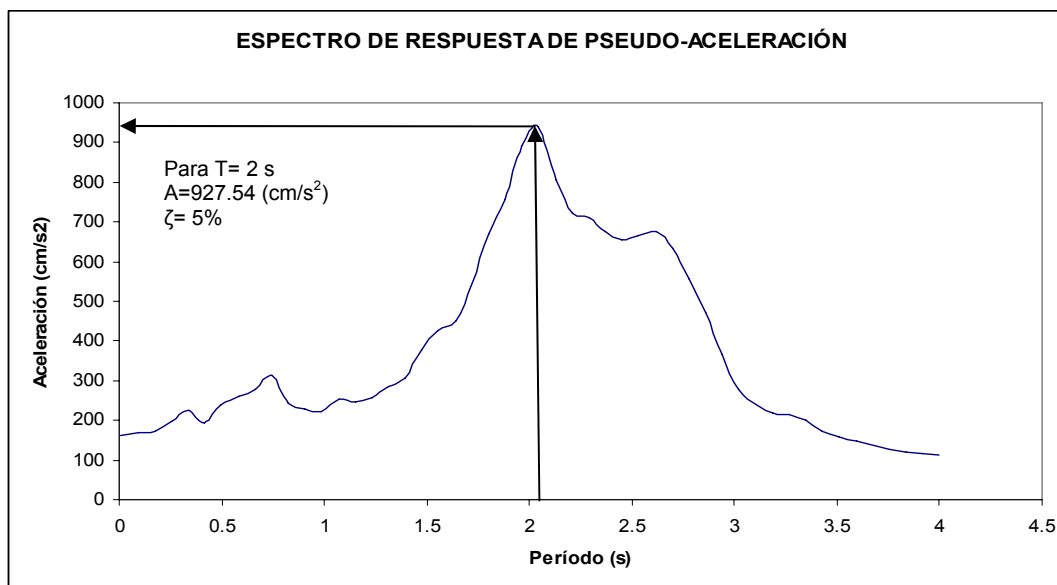


Figura A.4 Espectro de respuesta del registro de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) del temblor del 19 de septiembre de 1985.

APÉNDICE II

Manual para estimar Espectros de Respuesta por medio del programa VIBEFS

Estas son unas notas que describen la estructura de los archivos utilizados para calcular los Espectros de Respuesta Estimados (ERE) en la Ciudad de Oaxaca, utilizando la Teoría de Vibraciones Aleatorias, también contiene el procedimiento detallado para utilizar los programas involucrados en esta etapa del proceso de datos.

Se generó un directorio a nivel raíz, llamado OAXACA:

C:\OAXACA

El cual contiene subdirectorios con los sismos en los que la estación OXLC (Las Canteras) generó registro sísmico simultáneo con alguna de las demás estaciones de la red. Cada carpeta tiene por igual subdirectorios según las estaciones que hayan registrado tal sismo. Por ejemplo para el sismo 18, evento 1 del 6 de noviembre de 1999 lo registraron además de OXLC: OXFM, OXAL, OXPM, OXTO y OXCU.

S18-9911061

```
├── OXFM-OXLC
├── OXAL-OXLC
├── OXPM-OXLC
├── OXTO-OXLC
└── OXCU-OXLC
```

Se colocó en cada una de las carpetas anteriores los archivos ASCII estándar de aceleración de cada estación, a su vez todas las carpetas deben tener el archivo ASCII del registro en roca (OXLC), ya que con este se realizó el cociente espectral que da como resultado la Función de Transferencia.

Una vez elaborada la estructura anterior, se entra al programa *DEGTRA*, se abren las ventanas, se leen los archivos ASCII estándar correspondientes a cada componente, que puede ser NS, EO ó T, por ejemplo (Facultad de Medicina OXFM, y Las Canteras OXLC para el sismo 18, componente NS de Aceleración), se da corrección por línea base (NORMAL) y se salva el archivo ASCII de aceleración por componente en formato *degtra*, para componente NS con clave L, EO con T y Vertical con V (ej. FM18L.A y LC18L.A). Posteriormente se calculan y se salvan también los correspondientes a la componente EO y V: (FM18T.A y LC18T.A FM18V.A y LC18V.A).

Siguiendo en el programa y teniendo en memoria los dos archivos ASCII seleccionados anteriormente se calculan los Espectros de Fourier (con Factor de Suavizado 10 y *Taper* del 5 %) y se realiza la Función de Tránsito como el cociente espectral entre los dos EF y se salva este archivo en formato *degtra*, por ejemplo Facultad de Medicina entre Las Canteras, para el sismo 18, componente NS, su Función de Tránsito se llamó FMLC18L.FT. Se calcula y se salva también FMLC18T.FT y FMLC18V.FT, que corresponden a la componente EO y Vertical.

Como siguiente paso, se realiza el cálculo de los Espectros de Respuesta reales de aceleración absoluta, bajo los siguientes parámetros: número de puntos NP= 50, período inicial $T_i = 0.01$ s y período final $T_{final} = 3$ s, con un coeficiente de amortiguamiento de 0.05. Estos ER reales se utilizarán para comparar con los Espectros de Respuesta Estimados por medio de la Teoría de Vibraciones Aleatorias. Las claves utilizadas para guardar que se asignaron están en función de la estación, evento y componente, por ejemplo, para Facultad de Medicina es: FM18L.R (sismo 18, componente NS, Espectro de respuesta), también LC18L.R, FM18T.R, LC18T.R, FM18V.R y LC18V.R. Este mismo procedimiento se debe llevar a cabo para todos los eventos sísmicos seleccionados.

Como siguiente paso, se generó un subdirectorío llamado PROMEDIOS COMPLETOS con subdirectoríos (PROM-AL, PROM-BJ, . . . así sucesivamente para cada estación de registro sísmico), donde se colocan los archivos generados, como lo muestra la figura B.1.

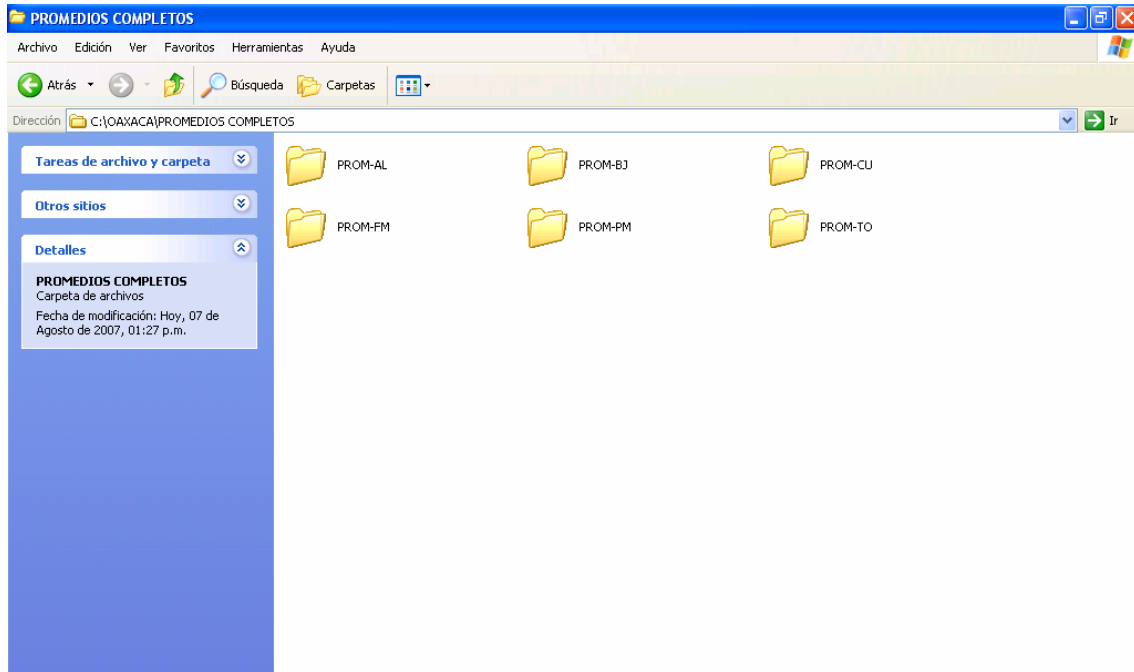


Figura B.1

Posteriormente se creó un subdirectorio dentro de cada uno de los anteriores, clasificados por sismos según su origen (profundo y superficial) (figura B.2), en el ejemplo se ilustra para la estación Alameda de León (AL).

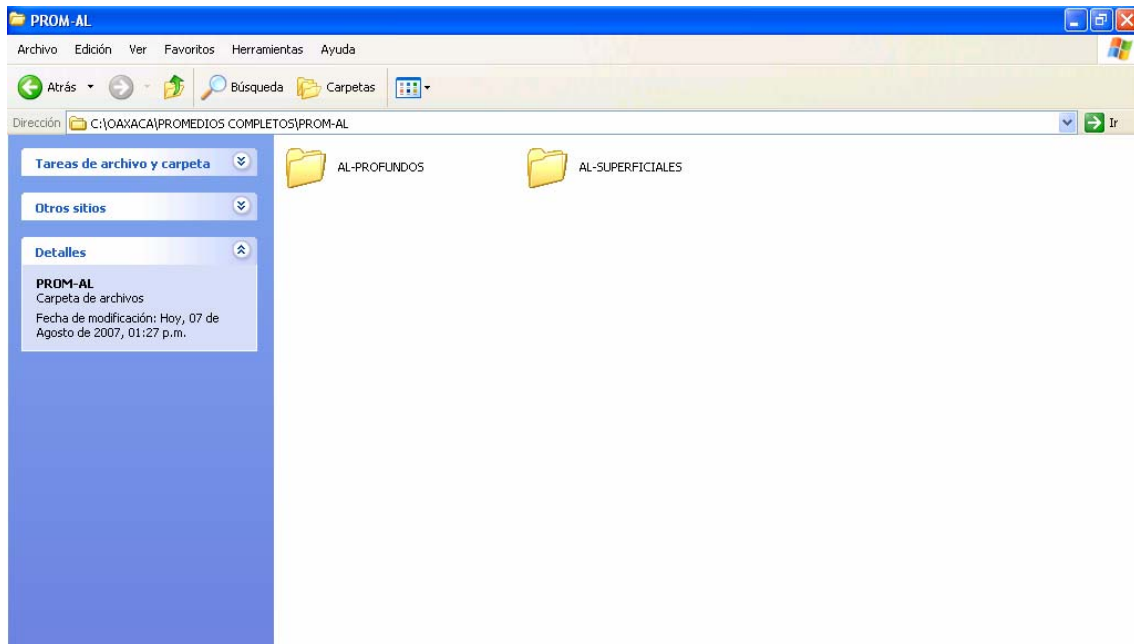


Figura B.2

Enseguida se ejecutó el programa *PROMEDIO* (ref. 38), el cual calcula la media de las funciones de transferencia para cada estación de registro sísmico por componente. Como primer paso se da de entrada el número de FT a promediar, seguido de Fmin, Fmax, Nf (frecuencia mínima, frecuencia máxima, y numero de frecuencias ej: 0.06, 35, 500), posteriormente hay que teclear el nombre del archivo de resultados, por ejemplo para Alameda de León entre Las Canteras (ALLCSSL.FTP; Sismos Seleccionados, componente L, Función de Transferencia Promedio). Finalmente se piden los nombres de las FT a promediar, para el ejemplo el primer registro es ALLC33L.FT (nombre de archivo de la Función de transferencia generado anteriormente en Degtra), después el nombre del registro numero 2 a promediar (ALLC34L.FT) y así sucesivamente hasta completar el numero de registros dado inicialmente, esto para cada componente de manera individual L, T y finalmente V. Por lo que existirán: ALLCSSL.FTP, ALLCSST.FTP, ALLCSSV.FTP. La figura B.3 muestra el proceso descrito.

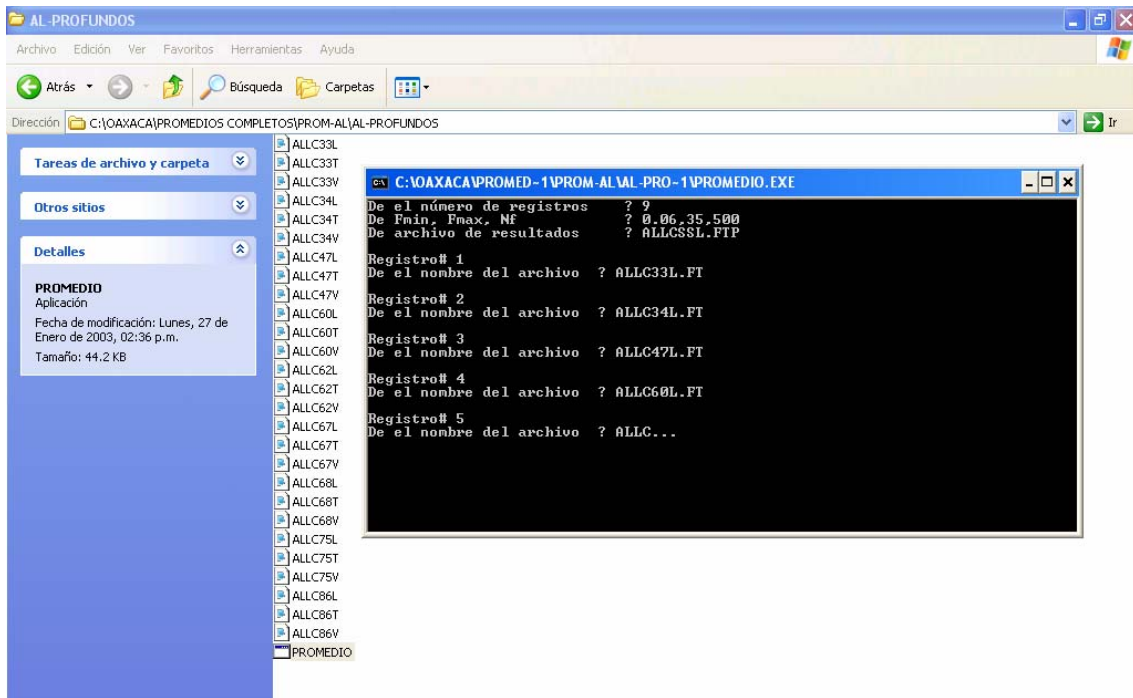


Figura B.3

A continuación se realizó un segundo cálculo, al considerar todas las funciones de transferencia L y T, que se denominó promedio Horizontal, ALLCH.FTP (Facultad de Medicina entre Las Canteras componentes horizontales, función de transferencia promedio). Para la componente V sólo se copió y se renombró de ALLCSSV.FTP a ALLCV.FTP.

El archivo de salida es como el mostrado en la figura B.4, el cual contiene cuatro columnas: la primer columna corresponde al vector de datos de la frecuencia, la segunda al vector de amplitudes de la función de transferencia promedio, la tercer columna la varianza (+) y la cuarta columna la varianza (-).

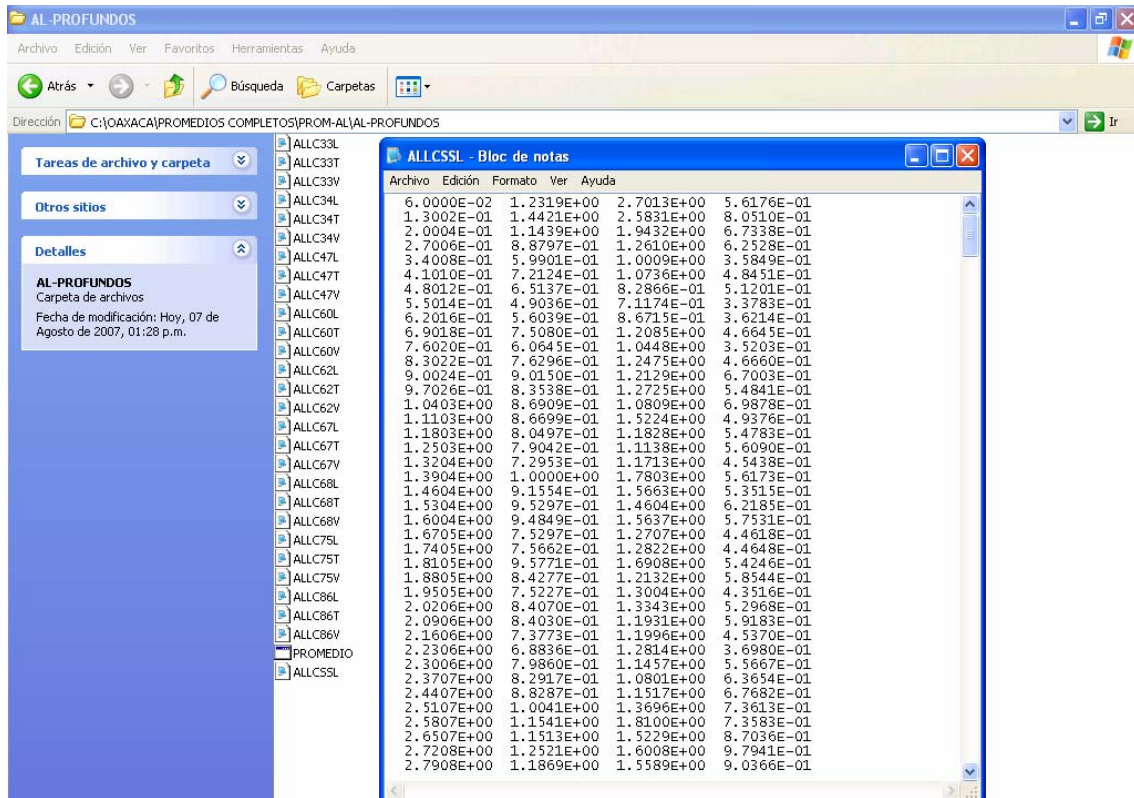


Figura B.4

Para calcular el Espectro de Respuesta Estimado, previamente hay que preparar un archivo de datos extensión .DAT, el cual hay que dar de entrada para el programa VIBEF5. El nombre de tal archivo corresponderá al evento y estación del cual se desea estimar el ER, por ejemplo para el sismo del 15 de junio de 1999 en la estación FM componente L se nombró como VLCFM13L.DAT, el cual contiene:

LC13L.A Nombre del archivo de aceleración del denominador de la función de transferencia obtenida anteriormente en DEGTRA (registro de la estación Las Canteras).

1765, 0.005, 31 Número de puntos del acelerograma, incremento de tiempo, duración de Arias (de Las Canteras).

FMLCH.FTP Nombre del archivo de resultados del promedio de la función de transferencia calculado anteriormente (editarlos para agregar una línea al inicio).

500 Numero de frecuencia en el archivo de resultados, según corresponda.

FM13L.RES Nombre del archivo de resultados del espectro de respuesta estimado.

El archivo para la componente T (VLCFM13T.DAT) contiene:

LC13T.A

1765, 0.005, 33

FMLCH.FTP

500

FM13T.RES

El archivo para la componente V (VLCFM13V.DAT) contiene:

LC13V.A

1765, 0.005, 27

FMLCV.FTP

500

FM13V.RES

Al ejecutar el programa VIBEF5 para cada componente, únicamente requiere como entrada el nombre del archivo generado anteriormente, el cual manda una leyenda con el numero de datos con el que esta realizado las operaciones, tarda unos segundos y finaliza, generando el archivo de resultados del Espectro de Respuesta Estimado, el cual tiene cuatro columnas de datos: la primera corresponde al vector de periodos, la segunda al vector de amplitudes del espectro exacto original, la tercer columna el vector amplitudes del espectro original sin efectos y la cuarta columna el vector del espectro considerando los efectos, tal como se observa en la figura B.5.

PERIODO	ESPECTRO EXACTO ORIGINAL	ESPECTRO TVA ORIGINAL	ESPECTRO TVA C/EFFECTOS
1.0000E-02	2.3511E+01	1.7003E+01	4.0927E+01
1.0990E-01	3.5420E+01	3.0995E+01	1.2639E+02
2.0980E-01	8.1802E+01	5.4084E+01	1.0996E+02
3.0970E-01	4.4892E+01	3.8987E+01	4.7151E+01
4.0960E-01	3.6536E+01	3.3996E+01	3.0454E+01
5.0950E-01	3.7619E+01	3.3962E+01	2.9157E+01
6.0940E-01	2.6312E+01	3.2445E+01	2.8527E+01
7.0930E-01	3.5560E+01	3.1107E+01	2.5564E+01
8.0920E-01	3.6900E+01	3.2088E+01	2.4347E+01
9.0910E-01	3.7560E+01	3.3405E+01	2.8878E+01
1.0090E+00	3.2522E+01	2.9496E+01	2.4191E+01
1.1089E+00	2.2971E+01	2.5193E+01	1.8721E+01
1.2088E+00	2.2773E+01	2.4669E+01	1.6218E+01
1.3087E+00	1.9002E+01	1.9659E+01	1.2186E+01
1.4086E+00	1.4061E+01	1.5700E+01	9.9274E+00
1.5085E+00	1.3950E+01	1.3785E+01	9.1623E+00
1.6084E+00	1.3105E+01	1.3986E+01	9.3929E+00
1.7083E+00	1.1783E+01	1.4000E+01	9.2348E+00
1.8082E+00	1.0118E+01	1.1343E+01	7.3763E+00
1.9081E+00	8.4241E+00	9.3343E+00	6.0313E+00
2.0080E+00	7.4881E+00	7.6358E+00	4.9816E+00
2.1079E+00	6.4616E+00	6.5332E+00	4.3523E+00
2.2078E+00	5.5327E+00	6.1644E+00	4.2014E+00
2.3077E+00	5.0671E+00	5.8681E+00	4.0876E+00
2.4076E+00	4.2432E+00	5.2914E+00	3.7398E+00
2.5075E+00	3.7703E+00	4.6938E+00	3.3300E+00
2.6074E+00	3.2484E+00	3.8930E+00	2.7482E+00
2.7073E+00	2.6197E+00	3.1516E+00	2.2152E+00
2.8072E+00	2.3946E+00	2.6168E+00	1.8374E+00
2.9071E+00	2.3772E+00	2.3150E+00	1.6231E+00
3.0070E+00	2.2306E+00	2.1531E+00	1.5131E+00

Figura B.5

Finalmente, con ayuda de Excel se graficó el Espectro de Respuesta Estimado, donde se toma el vector de la primer columna con el de la cuarta columna obtenida anteriormente. La figura B.6 muestra los ERE para los sitios AL, BJ, CU, FM, PM y TO para el evento del 15 de junio de 1999 (sismo 13).

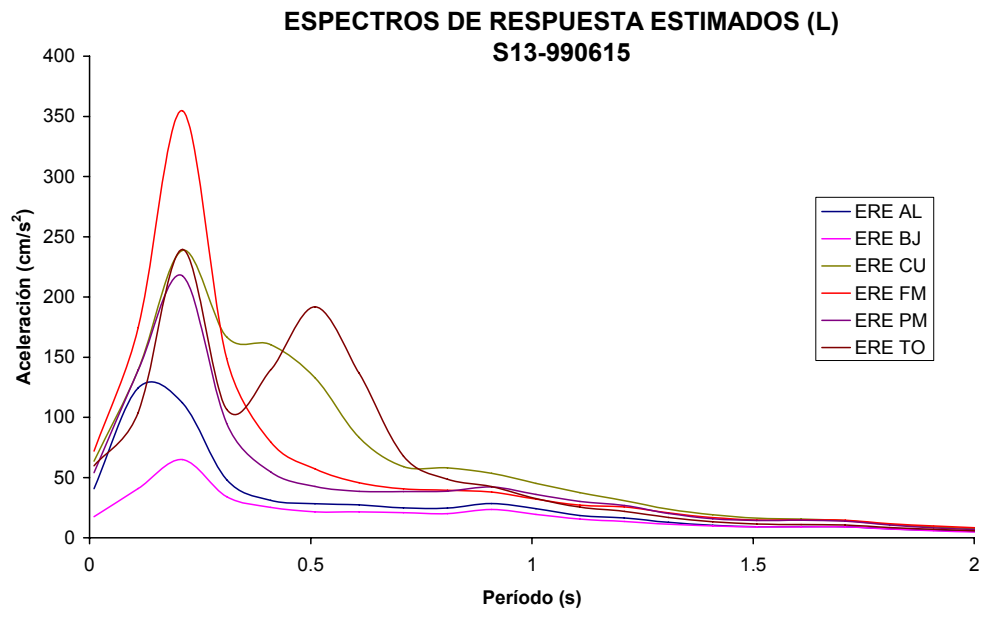


Figura B.6

REFERENCIAS

1. <http://www.diomedes.com/universo.htm>
2. Tolson G, "La Teoría de la Tectónica de Placas y la Deriva Continental", cuadernillo, Instituto de Geología, UNAM, México, (1998)
3. Nava A, "Terremotos", ed colección la ciencia para todos, México, (1998)
4. Tolson G, (1998), *op cit.*
5. Singh S K, *et al*, "The Oaxaca earthquake of 30 September 1999 ($M_w=7.5$): A Normal-faulting Event in the Subducted Cocos Plate", Seismological Research Letters, vol 71, No 1, 67-78, (2000)
6. Lira V, "Aplicación de los conocimientos de ingeniería civil en los efectos de sitio observados en una ciudad de mediano desarrollo ante acción sísmica", Tesis de licenciatura, UNAM, México, (2001)
7. Judson L, "Fundamentos de Geología Física", ed Limusa, México, (1989)
8. Espíndola J M y Jiménez Z, "Terremotos y Ondas Sísmicas una breve introducción", Instituto de Geofísica, No 1, UNAM, México, (1994)
9. Figueroa J, "Sismicidad en Oaxaca", Instituto de Ingeniería, No 360, UNAM, México, (1975)
10. Espíndola J M y Jiménez Z, *op cit.*
11. Figueroa J, (1975), *op cit.*
12. Lermo J, *et al*, "Microzonificación sísmica y análisis de amplificación relativa en la ciudad de Oaxaca (primera parte)", Informe elaborado para el Centro Nacional de Prevención de Desastres, México, (1991)
13. Lira V, (2001), *op cit.*
14. Alcántara L, Ovando E y Macías M A, "Estimación de Espectros de Respuesta utilizando Redes Neuronales Artificiales", Artículo elaborado para el Tercer Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, (2007)

15. Alcántara L, *et al*, "La base Mexicana de Sismos Fuertes. Un sistema de CD-ROM para la obtención de acelerogramas de 1960 a 1999", 2º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, España, (2001)
16. Singh S K, Comunicación directa
17. <http://www.ssn.unam.mx>
18. Brigham E O, "The fast Fourier transform and its applications", ed Prentice-Hall Inc, New Jersey, USA, (1988)
19. Newland D E, "Vibraciones aleatorias y análisis espectral", ed AC libros científicos y técnicos, Madrid, (1983)
20. Ordaz M, Castellanos F y Zapata A, "DEGTRA A4 versión 5.2", Instituto de Ingeniería, UNAM, México, (2000)
21. Timoshenko S, "Vibration problems in engineering", ed John Wiley and Sons, USA, (1974)
22. Chopra A K, "Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering", ed Prentice-Hall, USA, (2001)
23. *ídem.*
24. Newland D E, (1983), *op cit.*
25. Cartwright D E y Longuett-Higgins M S, , "The statistical distribution of the maxima of a random function", Proc. Royal Soc. London, vol A237, pp 212-232, (1956)
26. Vanmarke H E, "Structural response to earthquakes Seismic risk and engineering decisions", C Lomnitz and E Rosenblueth, editores, Elsevier Publishing Co, Ámsterdam, pp 287-337, (1976)
27. Boore D M, "Stochastic simulation of high-frequency ground motions base on seismological models of the radiated spectra", Bulletin of the Seismological Society of America, vol 73, No 6, pp 1865-1894, (1983)

28. Papoulis A, "Probability, random variables, and stochastic processes", ed McGraw-Hill International Book Company, (1985)
29. Ordaz M y Reinoso E, "Uso de la teoría de vibraciones aleatorias para la determinación de espectros de diseño del reglamento para las construcciones del D F", Memorias del VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Querétaro, pp A155-A157, (1987)
30. Reinoso E, " Un algoritmo para el cálculo aproximado de espectros de respuesta sísmica basado en la teoría de vibraciones casuales", Tesis de licenciatura, UNAM, México, (1986)
31. Papoulis A, (1985), *op cit.*
32. Boore D M y Joyner W B, "A note on the use of random vibration theory to predict peak amplitudes of transient signals", Bulletin of the Seismological Society of America", vol 74, No 5, pp 2035-2039, (1984)
33. Alcántara L, Ovando E y Macías M, "Aplicación de un Método Neuronal Artificial para estimar la Fase Intensa del Movimiento Sísmico", II Congreso Latinoamericano de Sismología, Chile, (2006)
34. Cartwright D E, Longuett-Higgins M S, (1956), *op cit.*
35. Ordaz M y Singh S K, "Sistema de cómputo VIBEFs", primera versión, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, (2006)
36. Chopra A K, (2001), *op cit.*
37. Bazán E y Meli R, "Diseño sísmico de edificios", ed Limusa, (1999)
38. Ordaz M, *et al*, "Sistema de cómputo PROMEDIO", Instituto de Ingeniería, UNAM, México, (2006)