

CAPÍTULO III

Determinación de los efectos de sitio

III. DETERMINACIÓN DE LOS EFECTOS DE SITIO

III.1 Marco teórico

En eventos sísmicos con alto índice destructivo existen evidencias de cómo altera la composición geológica del lugar el movimiento. Dependiendo del arreglo estratigráfico, que en la mayoría del territorio nacional son estructuras geológicamente complejas, se modifican drásticamente los movimientos generados por las ondas sísmicas (ref 26). Se puede afirmar que la amplificación del movimiento es producto de los efectos locales o de sitio, por los que el conocimiento de las características geológicas es de vital importancia para disminuir los daños ocasionados por estos fenómenos. Una de las actividades de interés para la sismología es la medición de las amplificaciones causadas por el suelo en áreas densamente pobladas (ref 27).

La amplificación de las ondas sísmicas se ha estudiado con más énfasis durante las últimas cuatro décadas, con diferentes modelos y propuestas para su evaluación, esta necesidad surgió al observar que los mayores daños en un sismo ocurrían en zonas con suelos que compartían ciertas características. Los estudios que se realizan para cuantificar estos efectos pueden llevarse a cabo mediante una comparación entre los registros obtenidos en dos o más estaciones, mientras más datos se tengan, mejor será la aproximación resultante al momento de realizar un modelo. Para conocer el comportamiento de un sitio, se realizan muchas suposiciones, en una situación ideal se deben conocer varios factores, como la estratigrafía del lugar, el tipo de falla que lo ocasionó, entre muchas otras variables, sin embargo, es difícil conocer con exactitud cada uno de los parámetros que describen un sismo, sin embargo, una forma de evaluar la influencia de las condiciones presentes en algún lugar puede obtenerse mediante estaciones de referencia instaladas en roca, que registrarán el movimiento causado por la onda sísmica sin la alteración de otro factor, mientras que una estación localizada en suelo estará influenciada por la estratigrafía del sitio. Es complicado tener las condiciones de estudio ideales, se debe tener un lugar con un afloramiento de roca que se encuentre unido a la corteza terrestre y no esté muy alejado de las otras estaciones con las cuales

se desea realizar la comparación, ya que existiría la necesidad de recurrir a algún modelo que corrija los efectos de atenuación causados por la lejanía entre las estaciones (ref 28).

Un ejemplo de lo que pueden causar los efectos de sitio sucedió en el sismo de 1985, ocasionando graves daños en gran parte de la Ciudad de México, siendo las áreas más afectadas las zonas centro, sur y occidente, lugares donde el tipo de suelo influyó en gran medida a que el comportamiento sísmico fuera muy diferente al de sitios localizados a menor distancia del epicentro, donde no existieron daños de consideración, este fenómeno pudo ser apreciado gracias a la instrumentación sísmica instalada, ya que sin estos recursos no hubiera sido posible observar detalles que resultaron tan importantes en ese momento, y que sin duda volverán a ocurrir cuando se presente un sismo con características similares.

En la figura III.1 se pueden apreciar distintos acelerogramas registrados en estaciones localizadas entre el lugar del epicentro y la Ciudad de México, las estaciones más cercanas al lugar, en donde se produjo el terremoto, están localizadas en roca, es notoria la atenuación que se tiene mientras más alejada se encuentra la estación. En el registro que se tuvo en Ciudad Universitaria, localizada en una zona de terreno firme, dicha atenuación fue importante si se compara con el registro más cercano al epicentro, debido a la gran distancia (aproximadamente 400 kilómetros), en otras estaciones que se encuentran cercanas a Ciudad Universitaria y cuya lejanía resulta despreciable si se compara con la distancia hasta el epicentro. La respuesta del suelo es completamente diferente, en el caso de la estación Viveros, ubicada en una zona con terreno de transición, se observa que existe amplificación del movimiento, pero al momento de compararlos con la estación localizada en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes hay una amplificación en la respuesta muy importante, llegando a un nivel de aceleraciones similares e incluso mayores al lugar donde se produjo el sismo, este fenómeno solo pudo ser causado por las condiciones locales, y en forma general, en los lugares donde se tuvieron daños importantes fue debido al tipo de suelo. En el último registro, obtenido de la estación Tlahuac Bombas no se observan niveles de aceleración tan grandes como los registrados en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, sin embargo al compararlo con los datos de las estaciones Ciudad Universitaria y Viveros es notoria una amplificación y un comportamiento totalmente diferente a los otros registros.

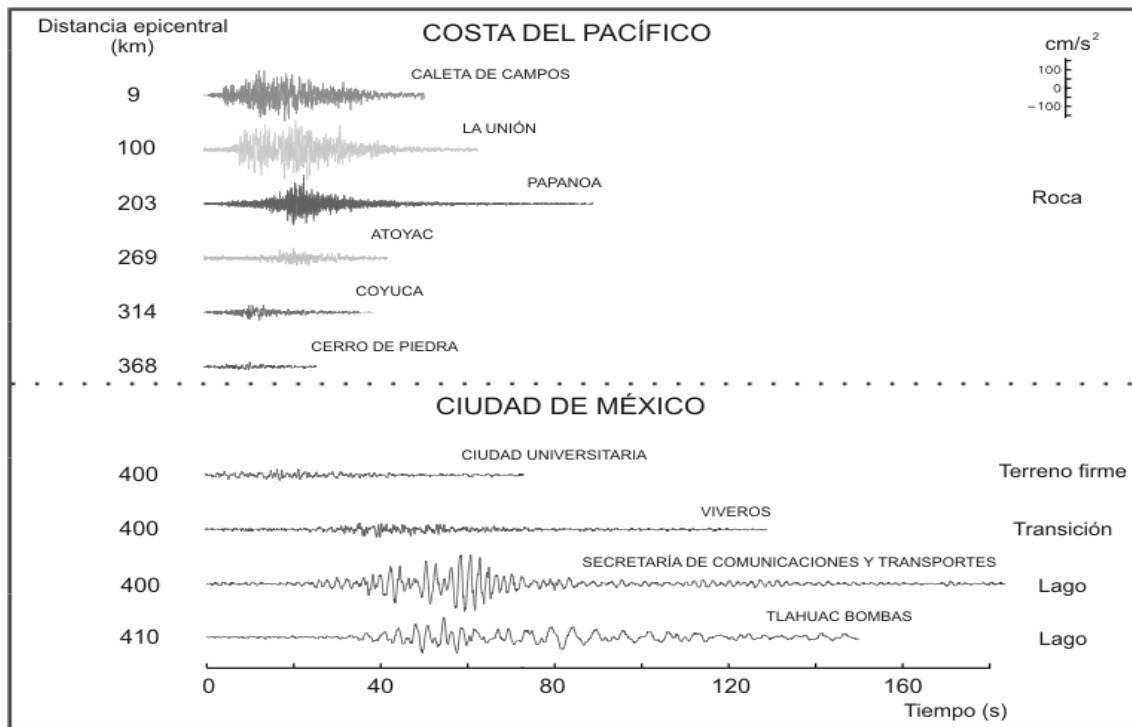


Figura III.1 Acelerogramas registrados durante el sismo del 19 de septiembre de 1985 (ref 29)

En la Ciudad de Puebla, al igual que en la Ciudad de México se presentan efectos de sitio, estos son totalmente diferentes debido a las variantes en las características del suelo, si se conociera exactamente la estratigrafía en cierto lugar y las características del acelerograma en la roca que subyace a un estrato de suelo se podría determinar la respuesta en la superficie, pero debido a que no es sencillo conocer con precisión las propiedades de un lugar, se recurre a modelos para tratar de cuantificar la amplificación de un lugar con respecto a otro.

Un efecto de sitio ocurrirá en cualquier lugar sometido a una excitación sísmica y variará con las propiedades del suelo, dicho fenómeno intensificará o atenuará la respuesta.

En la figura III.2 se ilustra la influencia de un estrato de suelo al registrar un evento sísmico en dos estaciones cercanas.

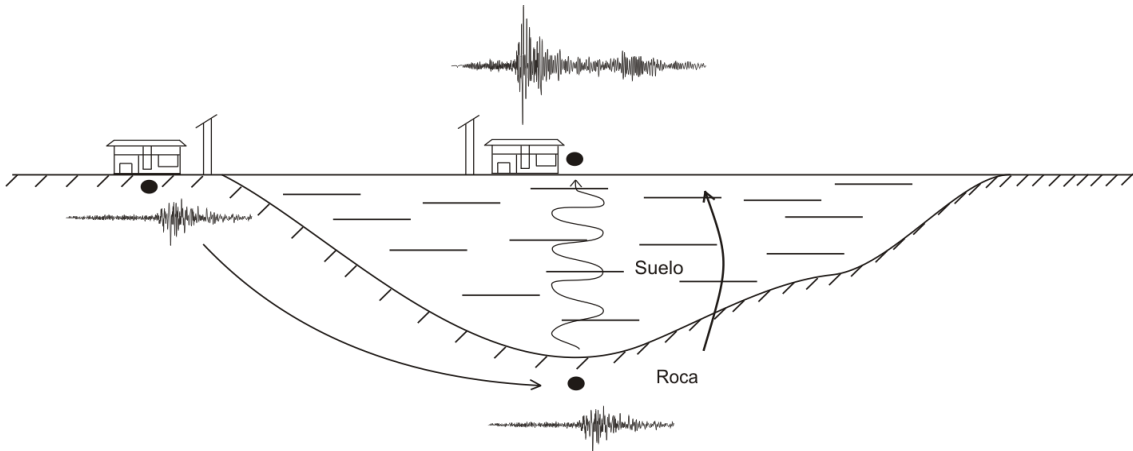


Figura III.2 Simulación de un efecto de sitio

Una aplicación al estudiar los efectos de sitio es conocer la amplificación de un lugar respecto a otro con diferentes características geológicas, un método utilizado son las Funciones de Transferencia, mediante estas se puede conocer el número de veces que se amplifica una onda sísmica y para que intervalo de frecuencias, lo cual es importante para determinar bajo que características se tendría la mayor modificación y por lo tanto el mayor riesgo. Los resultados obtenidos también pueden resultar de utilidad en caso de que las ondas sísmicas se atenúen en cierto intervalo. Resulta importante hacer mención de los Espectros de Fourier que serán la base para realizar el cálculo de Funciones de Transferencia.

Análisis de Fourier. Una herramienta matemática 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, que son ampliamente utilizadas en diversos campos de la ciencia; gracias al teorema desarrollado por el matemático Jean Baptiste Joseph Fourier y complementado por el alemán Dirichlet, es posible demostrar que toda función periódica continua, con un número finito de máximos y mínimos en cualquier periodo, puede desarrollarse en una única serie trigonométrica correspondiente a dicha función, conocida como serie de Fourier.

La extensión de estas series a funciones continuas lleva a expresiones matemáticas integrales como las transformadas de Fourier, mediante las cuales es posible determinar la relación existente entre los dominios del tiempo y frecuencia (ref 30).

La esencia de la Transformada de Fourier de una señal es descomponerla o separarla en una serie de senoides de diferentes frecuencias, las cuales corresponden a la suma de la original.

Mediante la siguiente expresión se define la transformada de Fourier:

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

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

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

$$j^2 = -1$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

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 (TDF), la cual puede ser estimada mediante un algoritmo conocido como transformada rápida de Fourier (TRF)(ref. 31). La ventaja de este algoritmo es que permite reducir el número de cálculos y funciona partiendo la señal completa en un cierto número de subseñales mas cortas y calculando la TDF de cada una de éstas, posteriormente la TRF las combina para obtener la TDF de la señal original.

Espectros de Fourier. Al aplicar la transformada rápida de Fourier a una señal se determina la relación de esta en un dominio de frecuencias asociadas a valores de amplitud. Cuando se grafica el resultado de esta operación se obtiene el espectro de

Fourier, 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.

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

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

$$X(\omega) = - \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \text{sen}(\omega t) dt$$

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

$R(\omega)$ = Parte real

$X(\omega)$ = Parte imaginaria

Una vez que se tiene el registro de un acelerograma y se requiere obtener su espectro de Fourier es importante realizar dos operaciones denominadas corrección de línea base y filtrado, estas permiten realizar una afinación de los datos, debido a que el registro sísmico puede tener alteraciones producto de vibraciones ajenas al propio evento como podrían ser movimientos producidos por vehículos u otros factores.

La figura III.3 muestra la componente longitudinal del sismo registrado en la estación PBPP el día 15 de junio de 1999 con su Espectro de Fourier correspondiente.

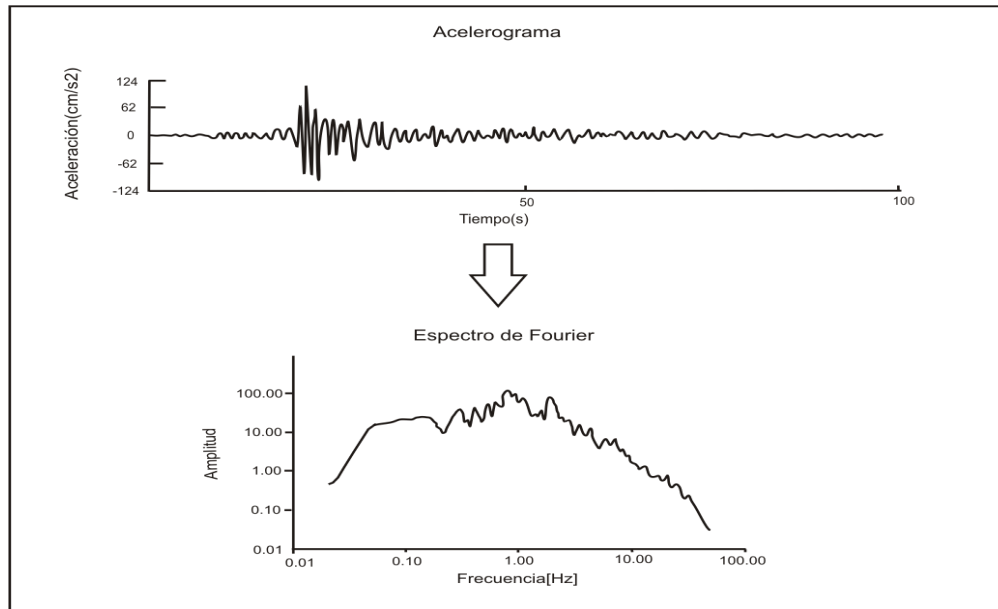


Figura III.3 Acelerograma y Espectro de Fourier

III.2 Funciones de Transferencia

Las Funciones de Transferencia en ingeniería sísmica han sido utilizadas para evaluar los efectos de sitio ya que establecen una relación entre dos sitios mediante un cociente, obteniendo el resultado en un intervalo de frecuencias.

Cálculo de Funciones de Transferencia. Conocidos los espectros de Fourier de dos sitios que se desean comparar (E_1 , E_2) se puede realizar un cociente espectral que da como resultado una Función de Transferencia, en la figura III.4 se observan dos espectros de Fourier y se ejemplifica una Función de Transferencia resultado de la operación realizada.

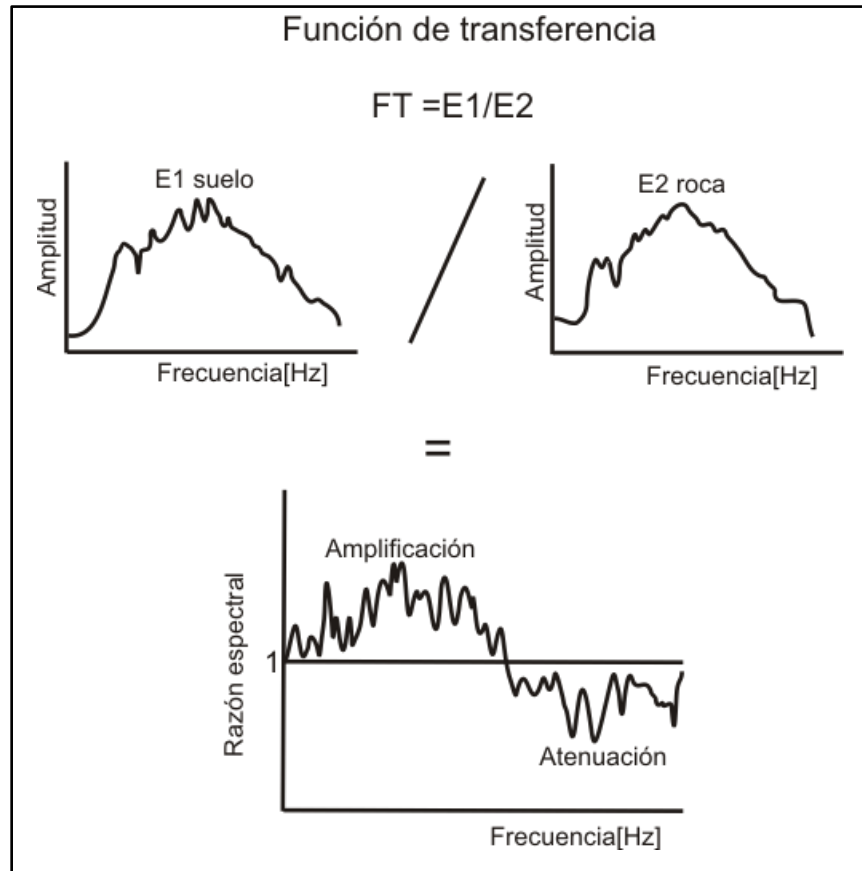


Figura III.4 Cálculo de una Función de Transferencia

Con el uso de las Funciones de Transferencia es posible estimar como variará el movimiento sísmico de un lugar a otro, lo que podrá determinar factores de amplificación o atenuación de la respuesta sísmica.

Después de seleccionar dos estaciones, la primera localizada en el sitio Paseo Nicolás Bravo (PBPP) con un terreno que tiene una estratigrafía compleja compuesto por un profundo estrato donde se encuentran suelos blandos, mientras la segunda estación se encuentra en el lugar Lomas del Mármol (LMPP) la cual fue instalada en un afloramiento rocoso, estos lugares fueron elegidos porque poseen condiciones ideales para observar cómo influye el tipo de suelo en la respuesta sísmica, además que existen registros simultáneos adecuados para realizar el estudio.

Una vez que se han reunido los acelerogramas respectivos se generan las funciones de transferencia a través del programa DEGTRA A4 (XP) (ref 32). Al cual se le debe proporcionar como archivos de entrada los registros de aceleración correspondientes y a continuación se da un resumen general de los pasos a realizar en el programa:

Dentro del programa en el menú principal se abre una ventana para cada componente del registro acelerográfico, en el caso de los registros en estudio se tienen tres componentes: (horizontal, longitudinal y vertical).

- En cada una de las ventanas debe leerse el registro, teniendo la debida precaución para no confundir cada una de las componentes
- Se realizan las instrucciones de corrección de línea base y filtro pasabanda
- El siguiente paso es calcular el Espectro de Fourier para cada una de las componentes de interés
- Una vez que se han calculado los Espectros de Fourier se realiza el respectivo cociente espectral obteniendo la función de transferencia, es importante indicar el numerador y denominador al momento de realizar la operación
- Con el uso de una Función de Transferencia se pueden determinar los cambios en la respuesta sísmica ocasionados por las características inherentes del terreno, gracias a esto se aprecian con claridad los efectos de atenuación o amplificación, lo cual es parte esencial de un efecto de sitio; con el uso de esta función es posible analizar la respuesta del sitio en el intervalo de frecuencias de interés
- El efecto de sitio para las estaciones seleccionadas será evidente debido a que las características del subsuelo son completamente distintas

Para apreciar los efectos de atenuación y amplificación con el uso de una Función de Transferencia, se simula un cociente entre Espectros de Fourier de una misma señal, la razón espectral de esta operación es uno, el resultado sería una línea recta paralela al eje de las abscisas con ordenada ubicada en dicho valor; teniendo esta operación como referencia se realiza el mismo cociente pero esta ocasión las señales serán diferentes, en los intervalos de frecuencia donde la razón espectral es mayor a uno se tendrá una amplificación de la respuesta sísmica, mientras que al ubicarse por debajo del valor uno existirá una atenuación; un indicador de la magnitud con que se amplifica o disminuye la respuesta sísmica es la razón espectral siendo esta igual al número de veces que aumenta o atenúa dicha respuesta, si para determinado valor de frecuencia la razón espectral tiene un valor de dos, la respuesta es del doble.

La Función de Transferencia originada tiene validez en un cierto intervalo de frecuencias, la consideración que se establece para fijar parámetros son valores predeterminados que en base a experiencia son de utilidad, los datos válidos de frecuencias a usar será de $0.05 \leq f \leq 35$ Hz

Funciones de Transferencia Promedio. Una vez realizadas las Funciones de Transferencia para todos los eventos seleccionados es posible obtener un promedio por cada componente, el resultado de esta operación es una Función de Transferencia Promedio (FTP), esta función engloba el intervalo de frecuencias donde se está amplificando la respuesta sísmica y el orden de magnitud que estará aumentando dicha señal.

Para ejemplificar este procedimiento, en la figura III.5 se presenta el resultado de obtener una Función de Transferencia Promedio de dos sismos obtenidos en los años de 1985 y 1989, la función presentada es el producto de registros en las estaciones SCT y CU en la Ciudad de México, la gráfica corresponde a la componente vertical. Estas estaciones están situadas en sitios con características diferentes, mientras que la estación de CU está localizada en una zona con terreno firme la estación SCT se encuentra en suelo blando, como consecuencia se tiene en este lugar una amplificación de la respuesta.

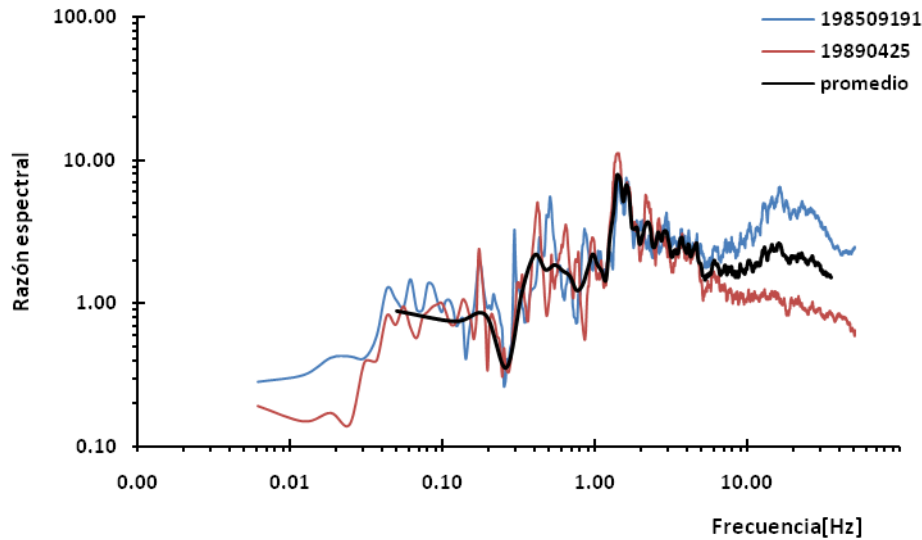


Figura III.5 Cálculo de una Función de Transferencia Promedio

III.3 Espectros de respuesta

Definición de espectro de respuesta. Un espectro de respuesta es una valiosa herramienta en el campo de la dinámica estructural que es muy utilizada en el diseño sísmico. De la manera más general se puede definir como un gráfico de las respuestas máximas (puede estar en términos de desplazamiento, velocidad, aceleración u otro parámetro de interés) que produce una acción dinámica correspondiente a todos los sistemas de un grado de libertad comprendidos en un intervalo de periodos y con amortiguamiento determinado.

Sistemas de un grado de libertad. Si se requiere describir el movimiento de un cuerpo en el espacio, es necesario referirlo a un sistema de referencia compuesto por tres ejes ortogonales, los movimientos descritos pueden dividirse en translaciones y rotaciones, sin embargo, si se añade una unión mecánica a este cuerpo varios movimientos quedan restringidos, se les denominan grados de libertad a los desplazamientos independientes que permanecen.

Es posible construir un sistema de un grado de libertad constituido por una masa concentrada (m), unido a una referencia fija mediante un elemento vertical que posee

cierta rigidez (k) y amortiguamiento (c), como se ilustra en la figura III.6. El conjunto integrado por m , c y k constituye un sistema de un grado de libertad con amortiguamiento (ref 33).

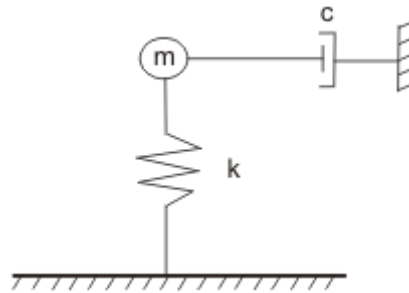


Figura III.6 Sistema de un grado de libertad

Cuando es movido el sistema estáticamente cargado los elementos internos ya no se encontrarán en equilibrio con las fuerzas externas ocasionando vibraciones, en el caso de los sistemas de un grado de libertad los movimientos en cualquier instante pueden expresarse en una sola coordenada.

La figura III.7 y III.8 ejemplifican una fuente de excitación externa debida a un movimiento sísmico, que tiene asociados desplazamientos originados por la fuerza excitadora (ref 34).

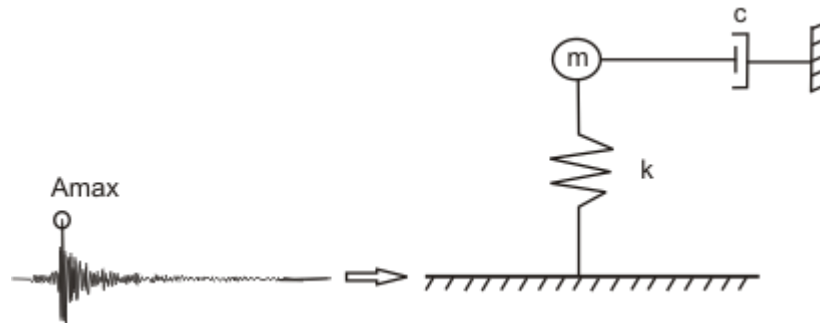


Figura III.7 Fuente de excitación sísmica

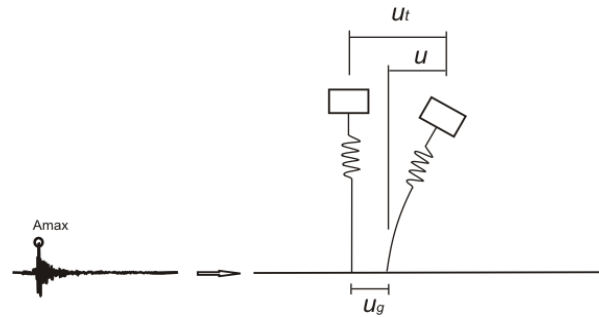


Figura III.8 Desplazamientos en el sistema de un grado de libertad

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

$$u^t(t) = u(t) + u_g(t) \quad (3.1)$$

Donde:

$u^t(t)$: 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

Analizando el equilibrio dinámico del sistema de la figura III.8 se obtiene el diagrama de cuerpo libre mostrado en la figura III.9

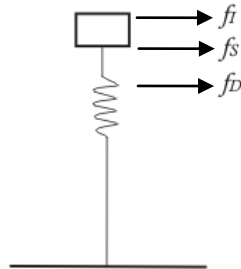


Figura III.9 Diagrama de cuerpo libre del sistema

Estableciendo el equilibrio se tiene:

$$f_I + f_D + f_S = 0 \quad (3.2)$$

$f_I \rightarrow$ fuerza de inercia
 $f_D \rightarrow$ fuerza de amortiguamiento
 $f_S \rightarrow$ fuerza de rigidez

Donde:

$$\begin{array}{l}
 f_I = m\ddot{u}^t \\
 f_D = c\dot{u} \\
 f_S = ku
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 m = \text{masa del sistema} \\
 \ddot{u}^t = \text{aceleración total del Sistema} \\
 c = \text{coeficiente de amortiguamiento viscoso} \\
 \dot{u} = \text{velocidad} \\
 k = \text{rigidez lateral} \\
 u = \text{desplazamiento}
 \end{array}
 \right.$$

Sustituyendo en la ecuación 3.2

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

pero

$$u^t = u + u_g$$

derivando

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

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

\therefore

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

finalmente

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

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

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

$$\ddot{u} + \frac{c\dot{u}}{m} + \frac{ku}{m} = -\ddot{u}_g \quad (3.5)$$

Considerando las siguientes definiciones:

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

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

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

ω_n = frecuencia circular natural de vibración

k = rigidez lateral del sistema

m = masa del sistema

T_n = periodo natural de vibración

ζ = relación de amortiguamiento o fracción de amortiguamiento crítico

c = coeficiente de amortiguamiento viscoso

c_r = 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:

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2 u = -\ddot{u}_g(t) \quad (3.6)$$

Se puede apreciar que en la última ecuación el desplazamiento $u(t)$ del sistema está en función de la frecuencia natural ω_n así como de la relación de amortiguamiento ζ , debido a esto dos sistemas que tengan los mismos valores de T_n y ζ tendrán valores de desplazamiento $u(t)$ idénticos aún cuando alguno de ellos tenga mayor masa o mayor rigidez que otro.

Para las respuestas del sistema de un grado de libertad en distintas condiciones de periodo y relación de amortiguamiento es evidente que para valores de mayor periodo y una relación de amortiguamiento constante el desplazamiento producido es mayor, de igual forma, si se mantiene fijo el valor de T y se aumenta el valor de la relación de amortiguamiento ζ la respuesta del sistema disminuye, este fenómeno se ilustra en la figura III.10.

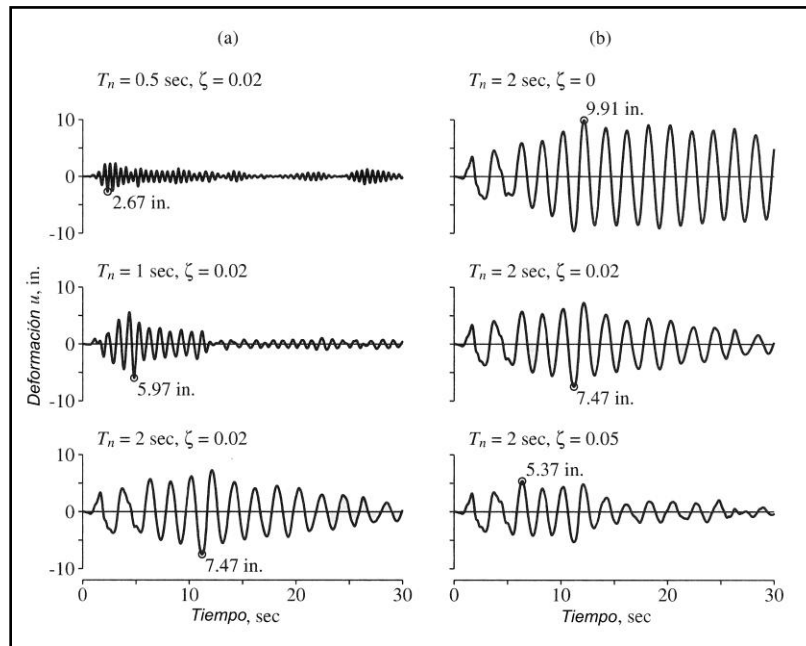


Figura III.10 Respuesta al desplazamiento de sistemas de un grado de libertad (ref 35).

Una forma de explicar el concepto de espectro de respuesta es la consideración de una serie de estructuras de un grado de libertad u osciladores simples, cada uno con diferente periodo de vibración T , y con igual relación de amortiguamiento ζ . Estos osciladores son sometidos a un mismo sismo, con el uso de un registro de aceleraciones $\ddot{u}_g(t)$, es de esperarse que cada uno tenga una respuesta diferente la cual puede representarse por medio de la historia de desplazamientos $u(t)$. Una vez realizado el cálculo de la respuesta en los osciladores es posible determinar el máximo en cada uno de ellos y expresarlos en un gráfico en función del periodo de vibración, obteniendo así un espectro de respuesta, es decir, que la respuesta máxima de cada oscilador con periodo T representa un punto del espectro como se ilustra en la figura III.11.

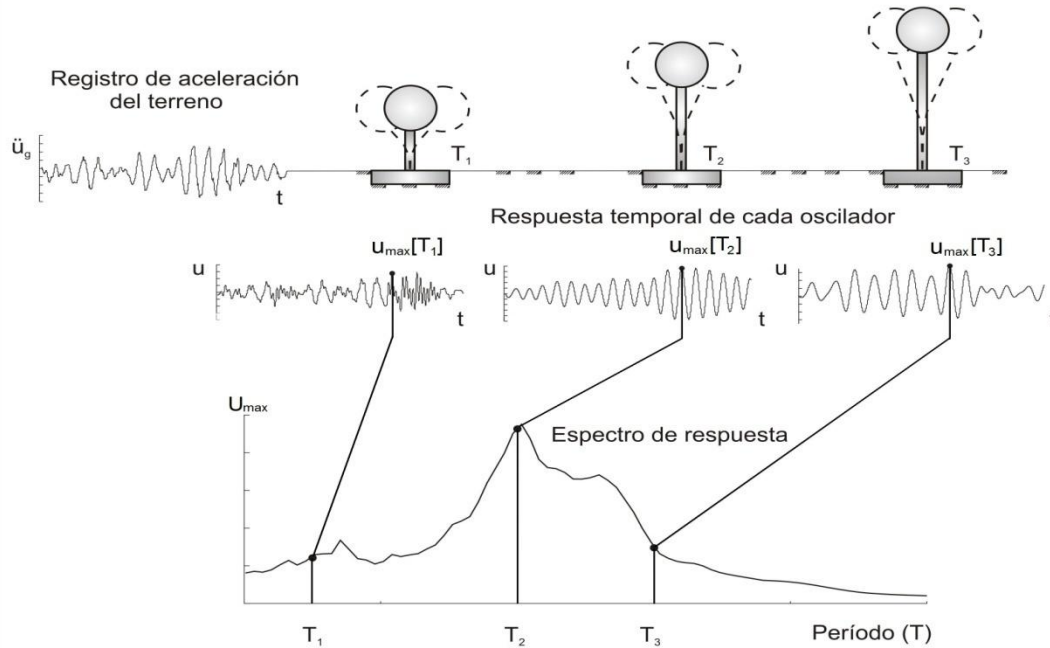


Figura III.11 Determinación de un espectro de respuesta

Existen varios tipos de espectros de respuesta (ref 36), algunos de ellos son los llamados pseudo-espectros tanto de velocidad como de aceleración. El primero V para un sistema de un grado de libertad con frecuencia natural ω_n y que tiene un desplazamiento $D = U_{max}$ producto de un movimiento sísmico del terreno está dado por la siguiente expresión:

$$V = \omega_n D = \frac{2\pi}{T_n} D \quad (3.7)$$

Donde V tiene unidades de velocidad y se relaciona con el valor máximo de energía de deformación E_{So} , que es almacenada durante el temblor mediante:

$$E_{So} = \frac{mV^2}{2} \quad (3.8)$$

Por otro lado, 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 $D = U_{max}$ debido a un evento sísmico en el terreno.

$$A = \omega_n^2 D = \left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2 D \quad (3.9)$$

Donde A tiene unidades de aceleración y se relaciona con el valor cortante máximo en la base V_{b0}

$$V_{b0} = f_{S0} = mA = \frac{A}{g}W = CW$$

W : peso de la estructura

g : aceleración de la gravedad

$C = \frac{A}{g}$: coeficiente de fuerza cortante

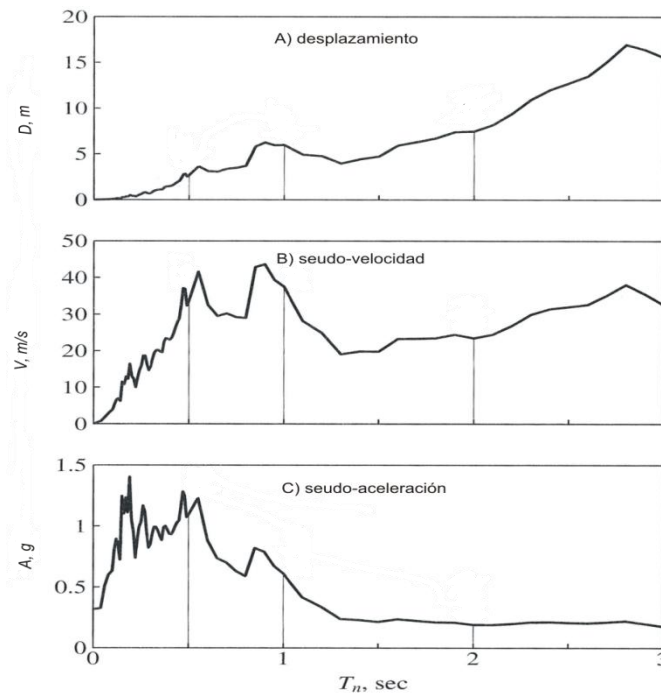


Figura III.12 Espectros de respuesta

III.4 Análisis de los efectos de sitio

Para realizar el análisis de los efectos de sitio, se examinarán los espectros de Fourier, siguiendo con las funciones de transferencia y por último los espectros de respuesta, se

mencionan algunas características observadas que resultan relevantes. En las figuras III.14 a III.16 se muestran los espectros de Fourier obtenidos después de analizar la información disponible, el intervalo de frecuencias considerado válido fue de .05 a 35 [Hz], en el caso de espectros de Fourier se encuentran agrupados los tres sismos utilizados por componente longitudinal, transversal y vertical, estos gráficos permiten conocer el comportamiento de cada evento en el dominio de frecuencias, era de esperar que la forma de los espectros en la misma estación fuera parecido.

En la figura III.14 se observan los espectros de Fourier obtenidos de la estación LMPP, para las tres componentes utilizadas la frecuencia de 1 [Hz] está asociada a la amplitud máxima de aproximadamente 1 [cm/s], este valor de amplitud se obtuvo debido a que la magnitud del sismo fue pequeña, cuando ocurra un sismo de mayor magnitud la amplitud máxima será mayor, mientras que la frecuencia será parecida a la obtenida en estos gráficos. Debido a que los sismos utilizados tienen magnitudes que se pueden catalogar como similares, ya que se encuentran en un intervalo de magnitud de 5.8 a 6.3, los espectros de Fourier obtenidos tienen una amplitud máxima cercana a 1 [cm/s], el espectro de Fourier del registro obtenido el día 13 de abril de 2007 tiene valores de amplitud un poco superiores debido a la magnitud del sismo, en las tres componentes para los espectros de Fourier de la estación LMPP se aprecian valores del mismo orden de amplitud y frecuencia, salvo la componente vertical que tiene una amplitud mayor.

En la figura III.15 se encuentran los gráficos obtenidos con los datos de la estación PBPP, con solo comparar preliminarmente los datos, puede apreciarse una amplificación en los valores, la frecuencia donde se tiene la amplitud máxima es menor a 1 [Hz], lo cual se relaciona con el hecho de que existe un periodo mayor en dicho lugar. La amplitud máxima es parecida en las componentes longitudinal y transversal, donde es de aproximadamente 8 cm/s, mientras que en la componente vertical tiene amplitud de 4 cm/s aproximadamente, es interesante observar como este mismo comportamiento se tuvo para los tres sismos. No es posible precisar únicamente con espectros de Fourier el intervalo de frecuencias donde existe una amplificación y de que orden.

En la figura III.16 se adjunta el espectro de Fourier obtenido con el sismo registrado el día 15 de junio de 1999 en la estación PBPP, este espectro fue agregado a los anteriores

para compararlos con un registro de mayor magnitud, este sismo fue de magnitud 7, sin embargo no fue posible analizarlo en las dos estaciones debido a que en ese entonces aun no estaba instalada la estación LMPP, al momento de comparar dicho espectro con los anteriores se tienen valores de amplitud máxima muy superiores, los valores de amplitud máxima apreciados son de 100 cm/s.

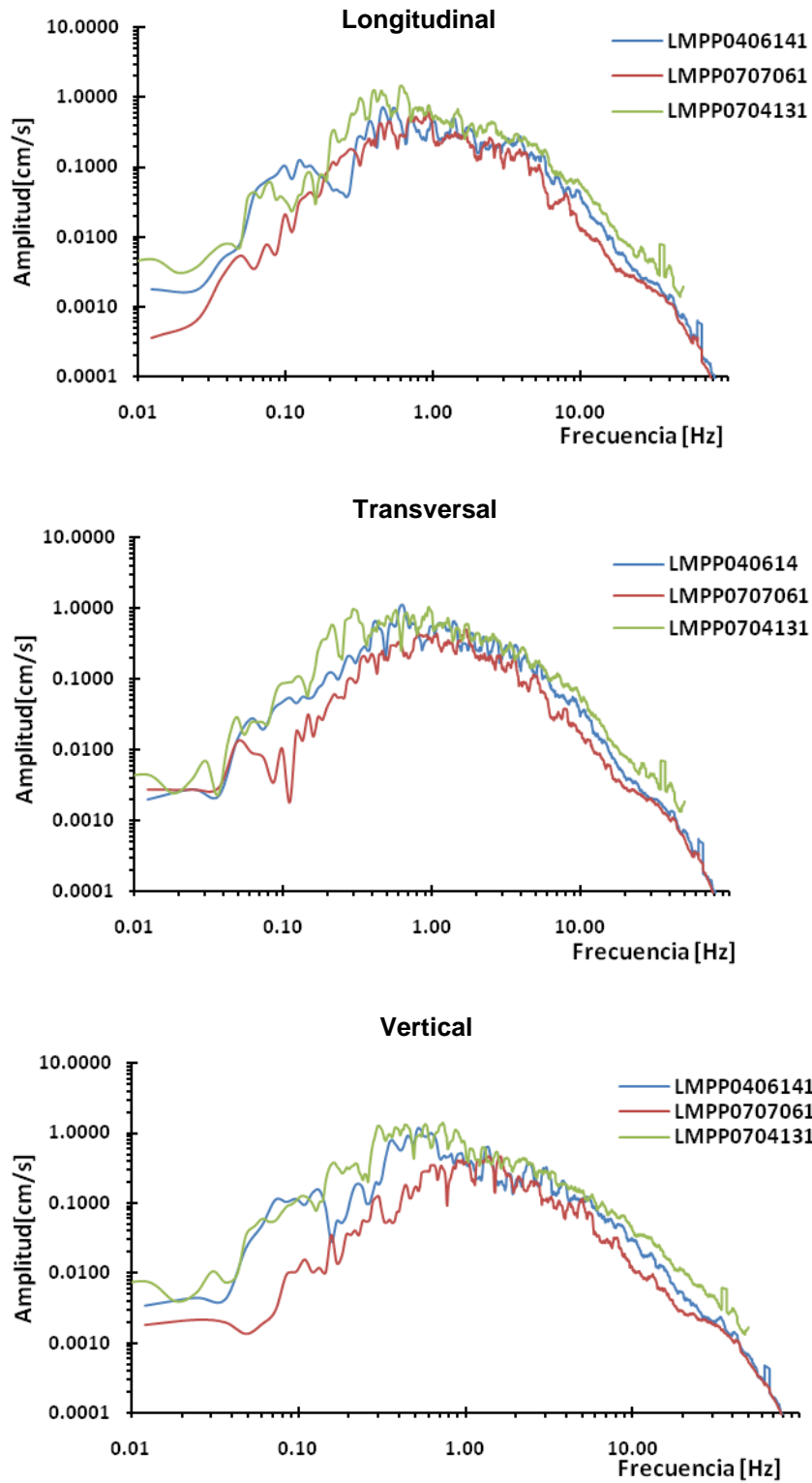


Figura III.14 Espectros de Fourier en la estación LMPP

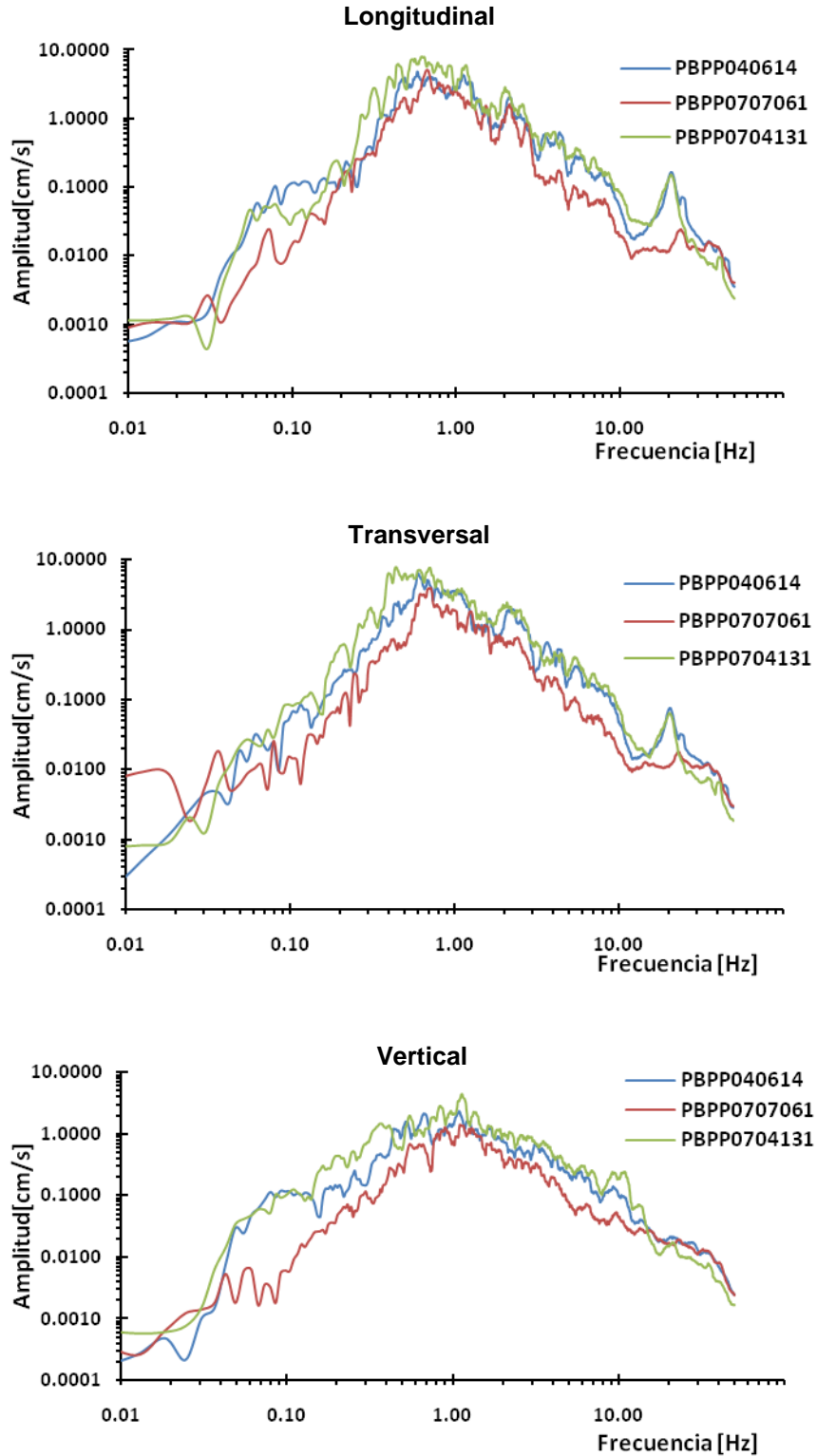


Figura III.15 Espectros de Fourier en la estación PBPP

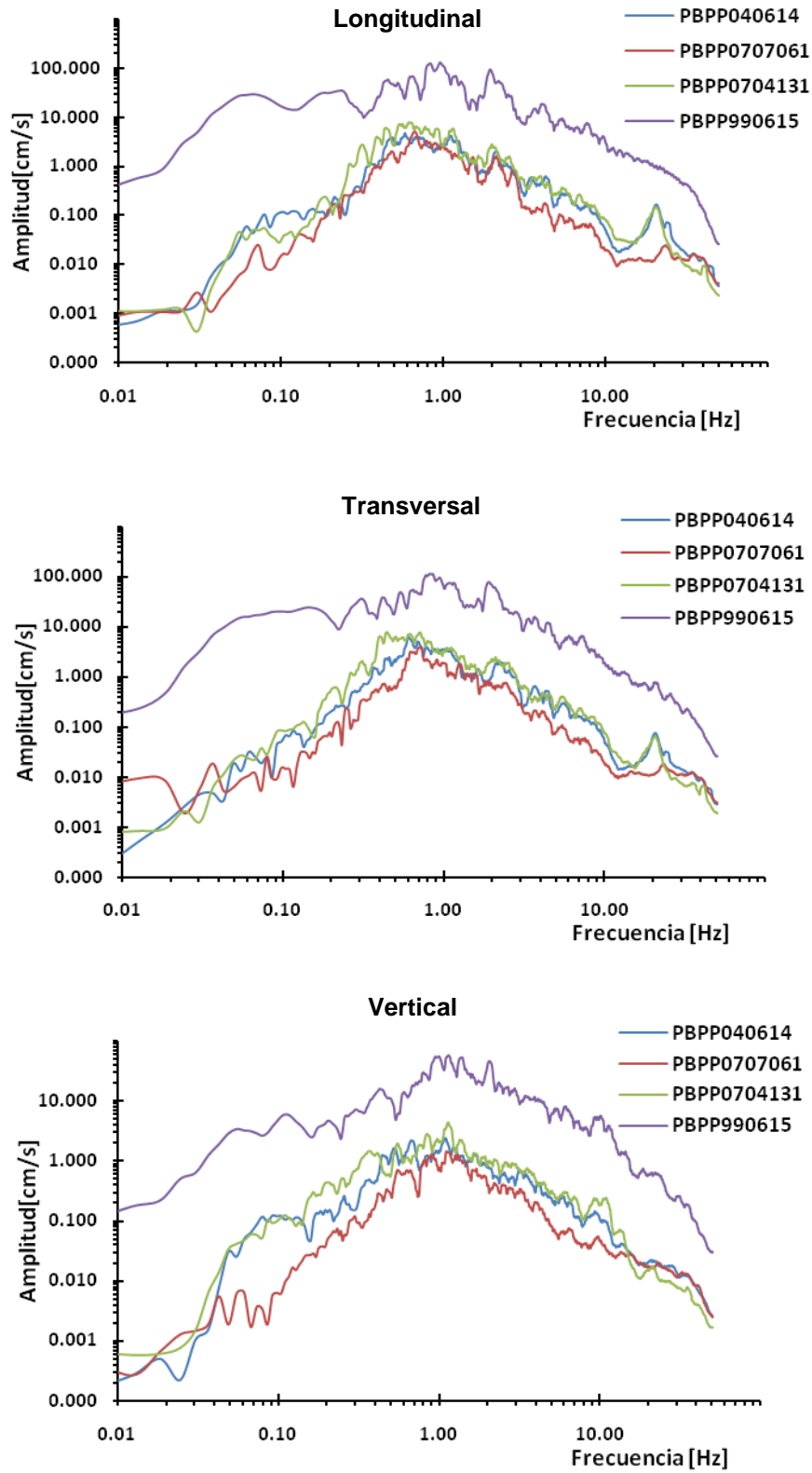


Figura III.16 Comparación entre espectros de Fourier obtenidos en la estación PBPP

Para realizar el análisis de las Funciones de Transferencia se utilizaron los espectros de Fourier simultáneos, se obtuvieron para cada evento y después se calculó la Función de Transferencia Promedio de cada componente; la longitudinal mostrada en la figura III.17, la transversal en la figura III.18, y como complemento la Función de Transferencia horizontal mostrada en la figura III.19, que engloba las seis funciones de transferencia anteriores. Se analizaron primeramente las dos componentes por separado, para observar cuál de ellas influye más en la amplificación de la respuesta sísmica.

En la Función de Transferencia longitudinal el aspecto más importante es que en casi todo el intervalo de frecuencias existe una amplificación en la respuesta, la mayor amplificación se tiene en una frecuencia de 20 [Hz], con un orden de quince veces.

En la Función de Transferencia transversal existe una ligera atenuación en frecuencias bajas, la máxima amplificación se tiene en una frecuencia de 0.8 Hz del orden de nueve veces.

Al evaluar la Función de Transferencia horizontal, el valor de amplificación fue cercano a nueve veces en la frecuencia de 0.8 [Hz] y se tiene una disminución hasta el valor de 10 Hz donde existe una ligera atenuación.

Para la Función de Transferencia vertical mostrada en la figura III.20 se obtuvo una amplificación de aproximadamente 8 veces para una frecuencia cercana a 1 [Hz]. La mayor amplificación se obtuvo en la componente longitudinal con un orden de magnitud 12 veces.

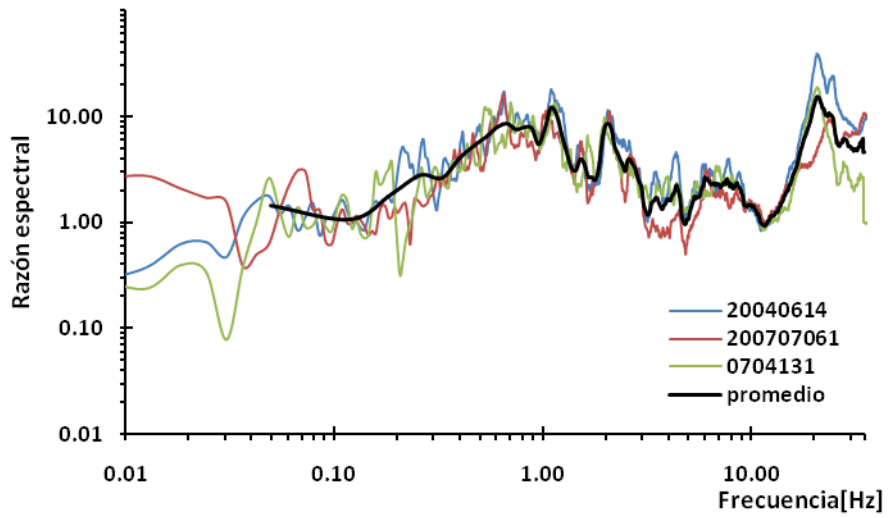


Figura III.17 Función de transferencia longitudinal

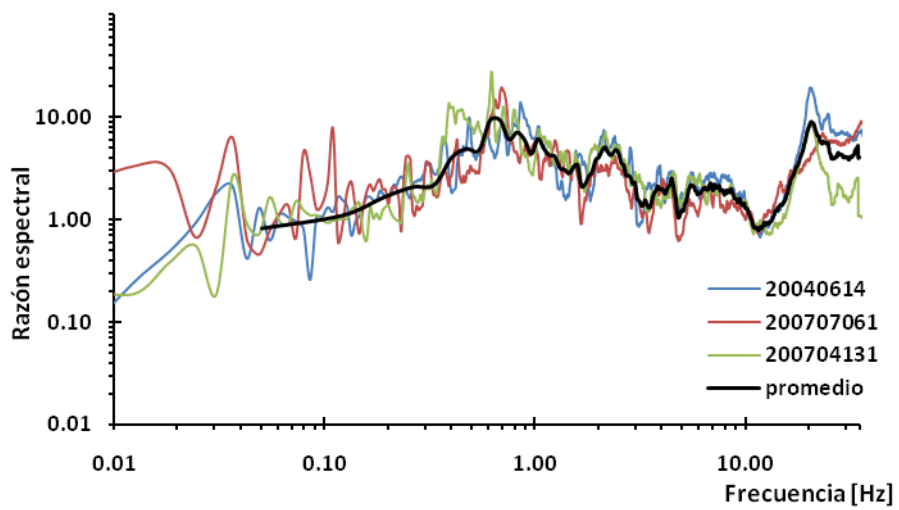


Figura III.18 Función de transferencia transversal

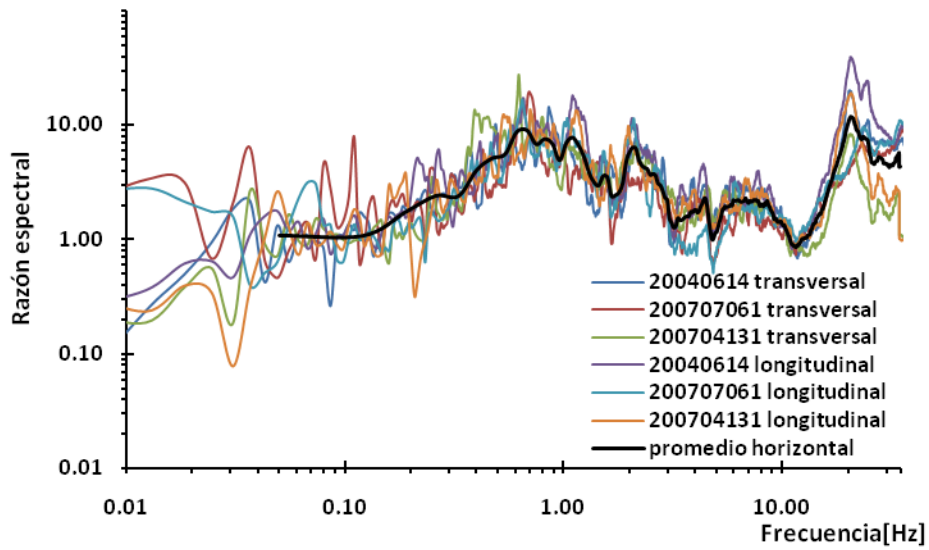


Figura III.19 Función de transferencia horizontal

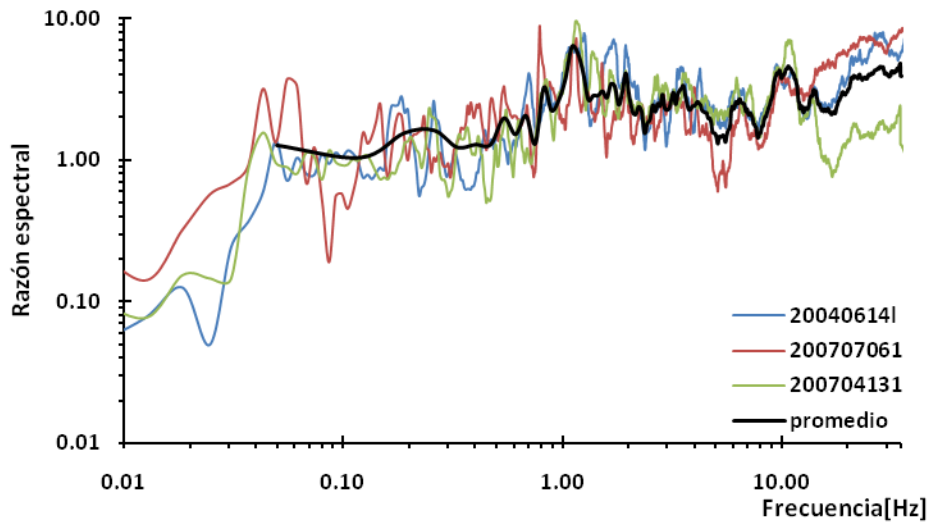


Figura III.20 Función de transferencia vertical

Los espectros de respuesta se encuentran agrupados por componente de tal forma que el espectro correspondiente a la otra estación sirva de referencia, en la figura III.21 se presentan los espectros originados el día 14 de junio de 2004, en la componente longitudinal de la estación Paseo Bravo se distinguen dos máximos con valores de pseudo-aceleración de aproximadamente 11 y 6 cm/s^2 ubicados en periodos cercanos a 0.8 y 1.8 segundos respectivamente, en la estación Lomas del Mármol se tiene un valor máximo de aproximadamente 2 cm/s^2 para un periodo de 0.3 segundos. En la componente transversal de la estación Paseo Bravo se observan tres valores de pseudo-aceleración máximos, los primeros dos localizados en 9 cm/s^2 y el tercero en 11 cm/s^2 aproximadamente, asociados a periodos de 0.5, 1 y 1.5 segundos, para la estación Lomas del Mármol no se observa claramente un valor máximo de aceleración, existen varios picos cercanos a 2 cm/s^2 . En la componente vertical de la estación Paseo Bravo el mayor valor de aceleración es de aproximadamente 5 cm/s^2 para un periodo de 0.3 segundos, en periodos un poco mayores se observan dos máximos cercanos a 4 cm/s^2 , en la estación Lomas del Mármol el mayor valor de aceleración se tiene en 2 cm/s^2 para un periodo de 0.2 segundos.

En la figura III.23 se presentan los espectros originados el día 6 de julio de 2007, en la componente longitudinal de la estación Paseo Bravo se tienen dos valores máximos de pseudo-aceleración de aproximadamente 8 y 6 cm/s^2 ubicados en periodos cercanos a 1 y 1.5 segundos respectivamente, en la estación Lomas del Mármol se tiene un valor máximo de aceleración cercano a 2 cm/s^2 para un periodo de 0.2 segundos. En la componente transversal de la estación Paseo Bravo se observa un solo valor de aceleración máxima ubicada alrededor de 6 cm/s^2 asociada a un periodo de 1.5 segundos, para la estación Lomas del Mármol se observa un valor máximo de aceleración cercano a 1.5 cm/s^2 localizado en un periodo de 0.5 segundos. En la componente vertical de la estación Paseo Bravo el mayor valor de aceleración es de aproximadamente 3 cm/s^2 para un periodo de 0.8 segundos, en la estación Lomas del Mármol el mayor valor de aceleración se tiene en 3 cm/s^2 para un periodo de 0.8 segundos.

En la figura III.24 se presentan los espectros originados el día 13 de abril de 2007, en la componente longitudinal de la estación Paseo Bravo se tienen tres valores máximos de pseudo-aceleración de aproximadamente 15 cm/s^2 comprendidos en periodos que van de

0.8 a 1.5 segundos respectivamente, en la estación Lomas del Mármol no se encuentra un valor máximo de aceleración siendo el valor recurrente cercano a 2 cm/s^2 . En la componente transversal de la estación Paseo Bravo se observa un solo valor de aceleración máxima ubicada alrededor de 12 cm/s^2 asociada a un periodo de 1.5 segundos, para la estación Lomas del Mármol se observan dos valores máximos de aceleración cercanos a 1.5 cm/s^2 localizados en periodos de 0.5 y 1 segundo respectivamente. En la componente vertical de la estación Paseo Bravo el mayor valor de aceleración es de aproximadamente 9 cm/s^2 para un periodo de 0.9 segundos, en la estación Lomas del Mármol el mayor valor de aceleración es muy pequeño, menor a 1 cm/s^2 para un periodo de 0.8 segundos.

Por último en la figura III.24 se presentan los espectros de respuesta obtenidos del sismo ocurrido el día 15 de junio de 1999, dichos espectros son de un orden de magnitud completamente diferente a los anteriores, ocasionando que los otros gráficos casi no se distingan, esto proporciona un parámetro de comparación con los espectros utilizados en este trabajo.

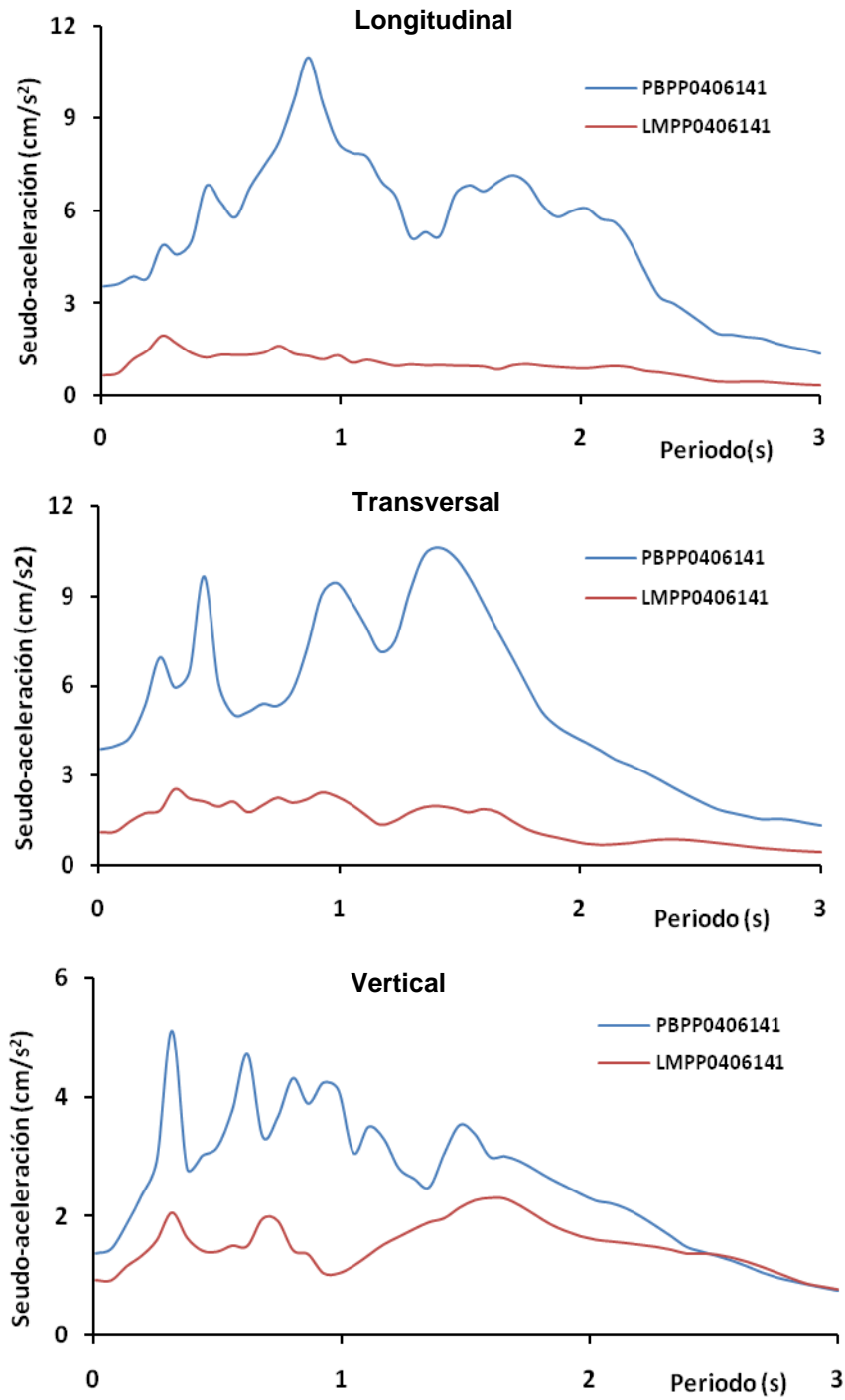


Figura III.21 Comparación de espectros de respuesta para el sismo del 14 de junio de 2004 (M=5.8)

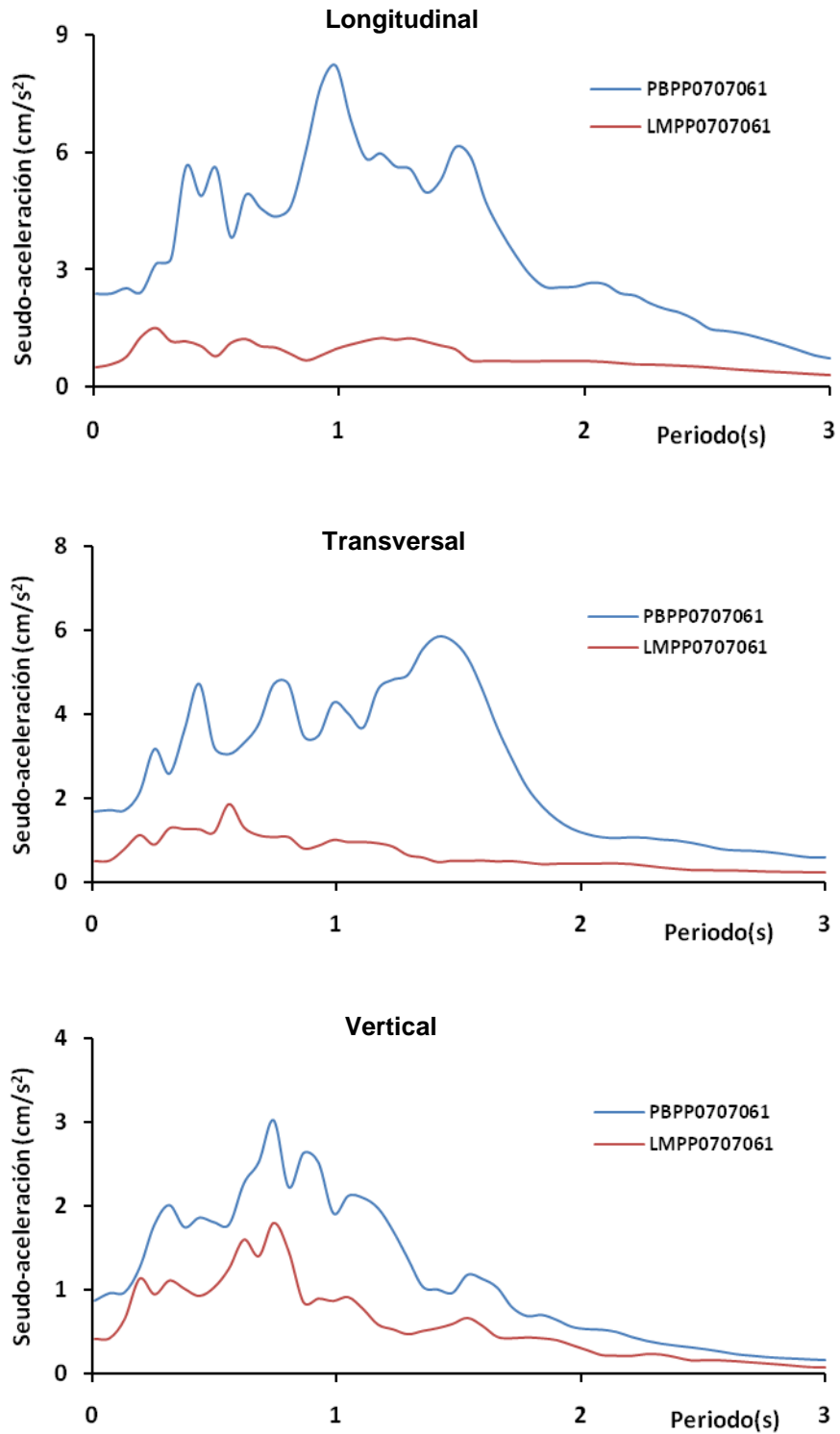


Figura III.22 Comparación de espectros de respuesta para el sismo del 6 de julio de 2007 (M=5.3)

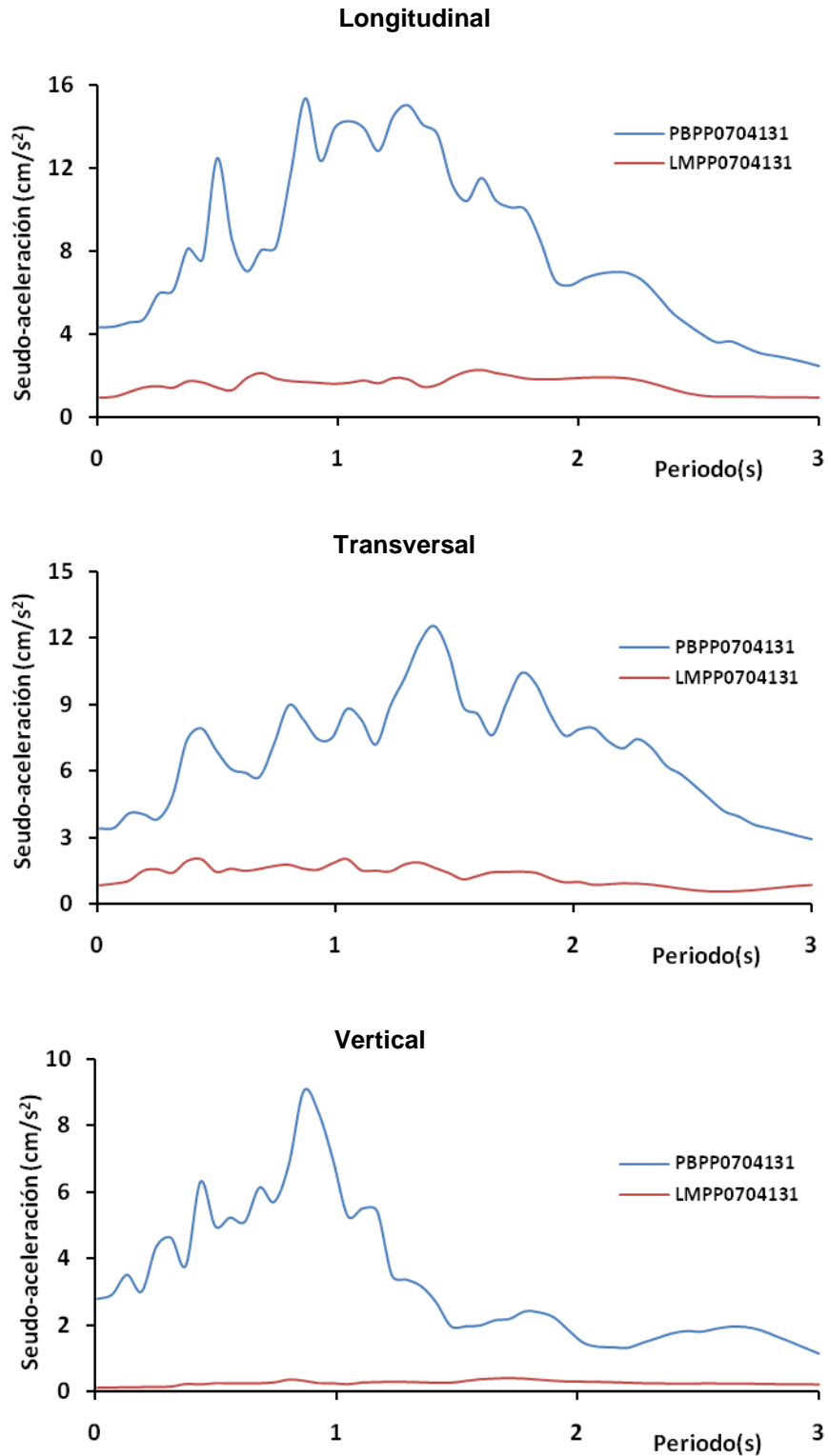


Figura III.23 Comparación de espectros de respuesta para el sismo del 13 de abril de 2007 (M=6.3)

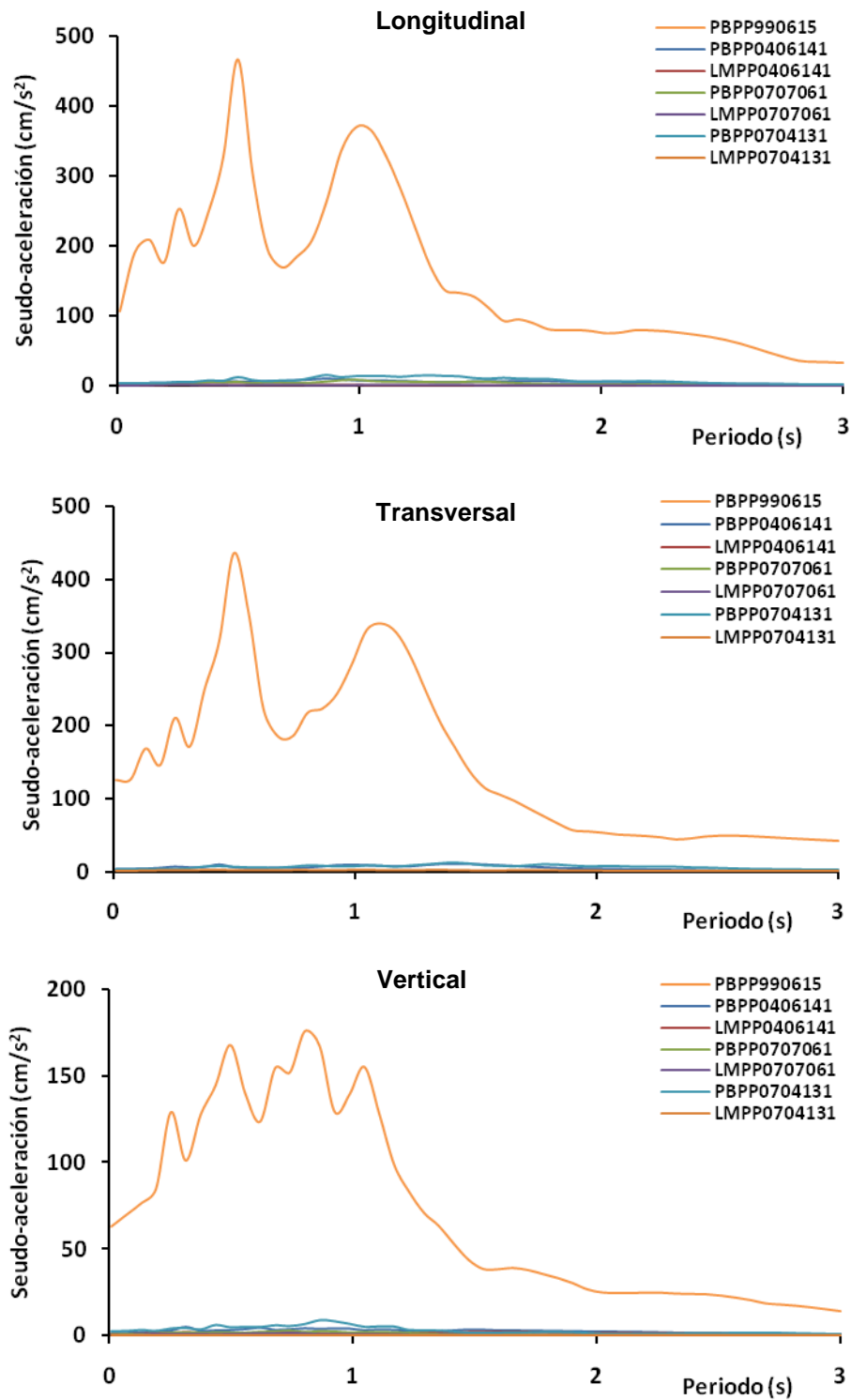


Figura III.24 Comparación entre espectros de respuesta para el sismo del 15 de junio de 1999 (M=7)