

## **CAPITULO 6: CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL SUELO.**

### **6.1 Introducción.**

Para determinar la amplificación y el periodo dominante del suelo primero se debe calcular la Función de Transferencia Empírica (FTE). Posteriormente, con base en ella se obtiene la Función de Transferencia Empírica Promedio (FTEP), mediante el análisis de registros de microtemores, los cuales de acuerdo a Yauri (2006) se definen como vibraciones aleatoria inducidas en la superficie de la tierra por medio de fuentes artificiales (vehículos, peatones, maquinaria, explosiones, etc.) o por fuentes naturales (oleaje, viento, la presión atmosférica, la actividad volcánica) (Tabla 25).

Tabla 25. Posible fuente generadora de microtemores y su rango de frecuencia (Bard ,1998; tomado de Flores, 2001)

Fuente.	Periodo	Rango de frecuencia
Son causadas por las ondas oceánicas que ocurren a grandes distancias	largos	Por debajo de 0.3 a 0.5 Hz
Son generadas por las olas del mar cercanas a la costa	intermedios	Entre 0.3-0.5 Hz y 1 Hz
Estas fuentes se relacionan con actividades antrópicas	cortos	Frecuencias mayores a 1 Hz

### **6.2 Cálculo del periodo dominante de vibración del suelo con microtemores.**

A través del los microtemores se pude evaluar el efecto de sitio, el cual se define como la respuesta sísmica que presenta un determinado lugar ante el paso de las ondas sísmicas.

### 6.2.1 Técnica de Nakamura.

La “Técnica de Nakamura” propuesta en 1989, permite obtener los periodos fundamentales de vibración del suelo por medio del análisis e interpretación de microtremores.

En primera instancia para poder determinar la FTE se debe obtener un estimativo del efecto de sitio (SE) por medio de la expresión:

$$S_E = \frac{H_S(w)}{H_B(w)}$$

Donde:  $H_S$  es el espectro de la componente horizontal superficial.  $H_B$  es el espectro de la componente horizontal en donde se origina el movimiento. Posteriormente, para calcular el efecto de sitio se debe eliminar el efecto de las ondas superficiales ( $A_S$ ) que están inmersas en el espectro de ondas verticales superficiales ( $V_S$ ) de las micro-trepidaciones y no en la base del movimiento ( $V_B$ ):

$$A_S(w) = \frac{V_S(w)}{V_B(w)}$$

Al eliminar el efecto producido por las ondas Raleigh el efecto de sitio queda determinado por la función:

$$S_M = \frac{S_E(w)}{A_S(w)} = \frac{H_S / V_S}{H_B / V_B}$$

Sin embargo Nakamura (1989) demostró que:

$$\frac{H_B(w)}{V_B(w)} \approx 1$$

Por lo tanto, la técnica de Nakamura muestra que a partir de la relación de cocientes espectrales entre la componente vertical y la componente horizontal de un mismo sitio se

puede obtener una estimación del efecto de sitio para las ondas internas por medio de la expresión:

$$S_M(\omega) = \frac{H_S(\omega)}{V_S(\omega)} :$$

### 6.2.2 Registro de vibración ambiental: equipo de medición.

Para el registro de los microtremores se utilizaron dos acelerómetros digitales marca KINEMATRICS, modelo Altus K-2 (Figura 18).



Figura 18. Acelerómetro marca KINEMATRICS, modelo Altus K-2.

### 6.2.3 Trabajo de campo.

La adquisición de los registros de microtremores se realizó del 24 al 30 de enero del 2010. Durante este periodo se obtuvieron 228 registros de ruido ambiental.

En la Figura 19 se muestra la cabecera municipal de Motozintla, Chiapas, en donde se registraron 228 microtremores, a partir de los cuales se determinó el comportamiento dinámico del suelo estimando la FTE.

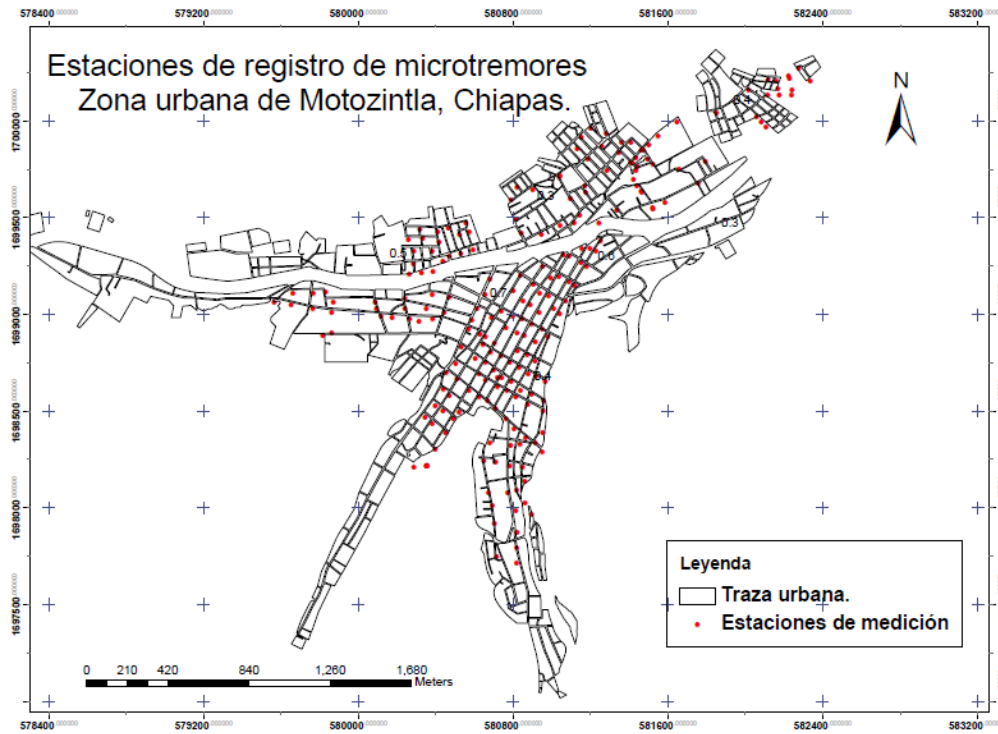


Figura 19. Localización de las 228 estaciones de medición de ruido ambiental.

En cada estación de medición se efectuó un muestreo con una duración promedio de 120 segundos. Para asegurar una correcta adquisición de los registros sísmicos, el equipo de registro se niveló considerando que la componente sur del movimiento corresponde al norte- sur geográfico y análogamente la componente este-oeste.

#### 6.2.4 Procesamiento de las señales.

Posterior a la adquisición de registros de vibración ambiental se inició su procesamiento, el cual se describe a continuación (Figura 20).

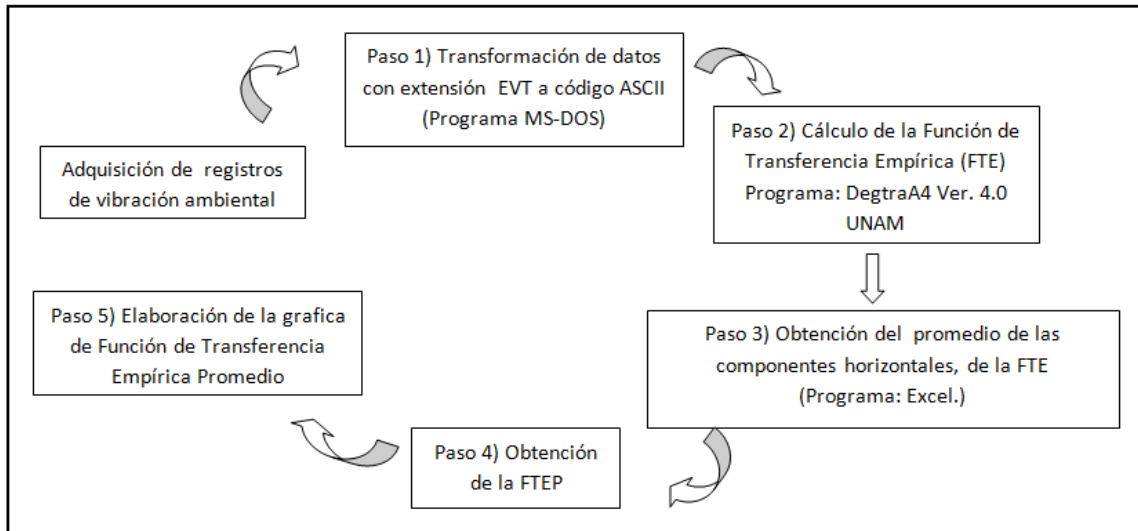


Figura 20. Metodología para el procesamiento de microtremores

Paso 1) Los archivos que proporciona el acelerómetro tienen la extensión EVT que presenta un código binario y las amplitudes están dadas en milivolts. Estos archivos fueron transformados a código ASCII por medio del sistema operativo MS-DOS y el programa KW2ASC que genera tres archivos correspondientes a la componente norte-sur, este-oeste y a la vertical del movimiento del suelo.

Paso 2), Calculo de la Función de Transferencia Empírica o cocientes espectrales de las componentes N-S, E-W sobre la componente vertical para cada registro adquirido en campo por medio del programa Degtra A4 ver. 4.0.7, UNAM (Ordaz y Montoya, 2003).

La metodología para la obtención de la FTE es:

- a) Visualización de los acelerogramas, correspondientes a la componente horizontal (N-S, E-W) y vertical de vibración del suelo (Figura 21).

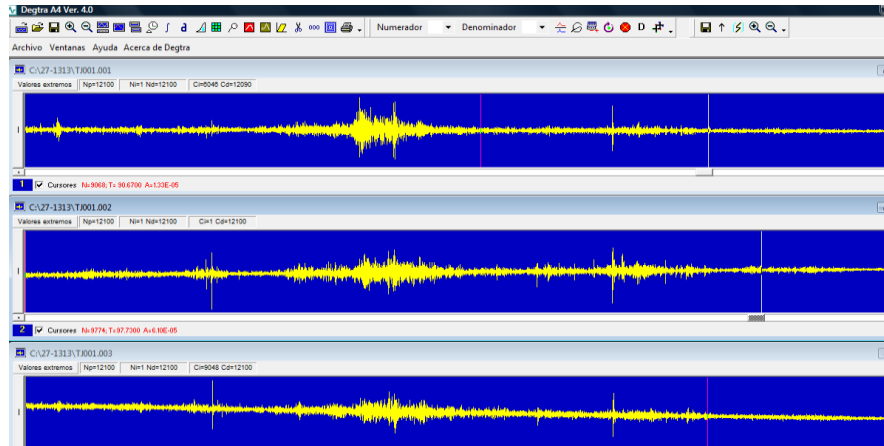


Figura 21. Componente horizontal y vertical del registro de microtremor TH.

- b) Designación del Diferencial de Tiempo: 0.01 seg.
- c) Corrección de línea base (modo normal).
- d) Selección de 5 ventanas en cada señal sísmica, discriminando las señales transitorias (causadas principalmente por vehículos y peatones cercanos a los instrumentos) presentes en los registros.
- e) Obtención del Espectro de Fourier (Figura 22) utilizando 4096 puntos (NTF), un suavizado (utilizado para visualizar el espectro de amplitudes) igual a seis y un “tapering” de 5 % (Función cosenoidal cuya longitud, al inicio y al final de la señal, es una fracción de su longitud total).

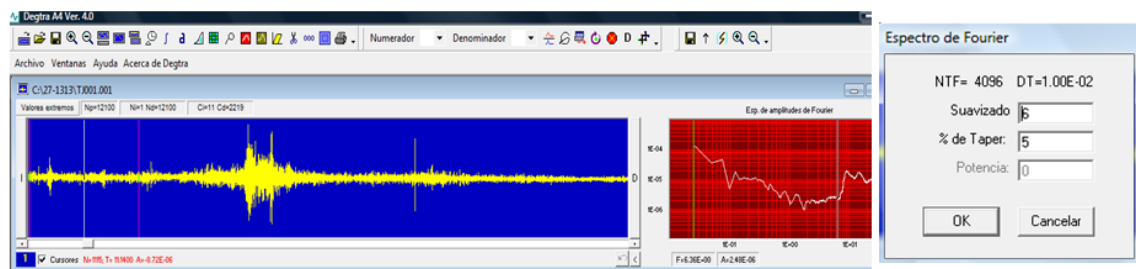


Figura 22. Espectro de Fourier del registro de microtremor TH.

- f) Cálculo de la Función de Transferencia Empírica (Figura 23) con la “Técnica de Nakamura” (HVNR) descrita anteriormente.

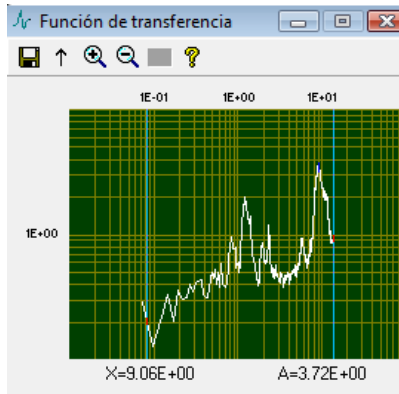


Figura 23. Espectro de Fourier del registro de microtremor TH.

Paso 3) Determinación del promedio de las componentes norte-sur, este-oeste, para cada punto, a través de los valores proporcionados por la Función de Transferencia Empírica (amplitud v/s frecuencia) de cada punto de medición con ayuda del programa Excel.

Paso 4) Obtención de la Función de Transferencia Empírica Promedio (FTEP), a partir del promedio de cada componente de la FTE. En la Figura 24 se presenta un ejemplo de las componentes horizontales del un punto de medición TH, donde se han graficado con líneas delgadas los cocientes espectrales de las cinco ventanas seleccionadas y con línea gruesa su promedio.

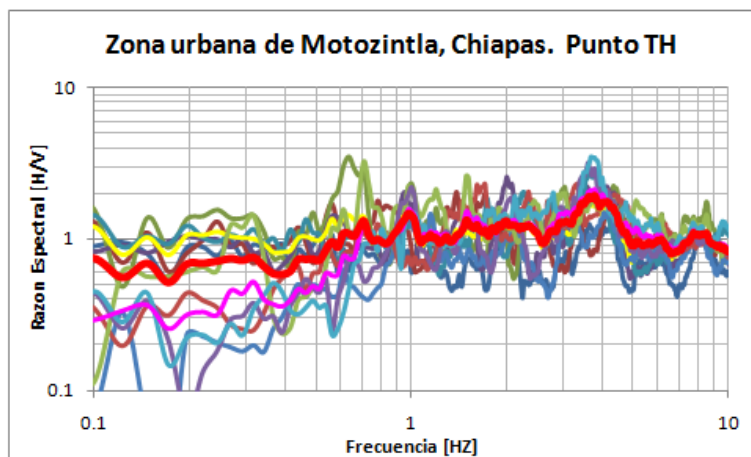


Figura 24. Ejemplo de FTE (líneas de delgadas) y FTEP (línea gruesa de color rojo) de la estación de registro TH.

### 6.3 Cálculo de amplificación y periodo dominante del suelo con sismos.

La FTE obtenida con los métodos empíricos “Razón Espectral Estándar (SSR)” y “Nakamura con sismos (HVSR)” a través del análisis de movimientos fuertes se describe a continuación:

- a) El método Razón Espectral Estándar (SSR) requiere mediciones de dos estaciones sísmicas (estación de referencia y estación de interés) que deberán registrar el mismo evento sísmico. La estación de referencia se coloca sobre un terreno firme (roca sana o lo menos alterada posible). La estación de interés se posiciona sobre el sitio donde se desea conocer el efecto de sitio (Lermo y Chávez-García, 1994a, b).

La desventaja de esta técnica es que necesita registros simultáneos en las estaciones del sitio de interés y en el de referencia, también puede ser complicado definir la ubicación de la estación de referencia, ya que su respuesta ante un movimiento sísmico debe ser mínima.

- b) Técnica de Nakamura con sismos (HVSR): Esta técnica fue propuesta por Lermo y Chávez-García (1993), a diferencia de la técnica anterior no requiere de una estación de referencia. Su metodología consiste en dividir el espectro de amplitud de Fourier de la componente horizontal entre el espectro de la componente vertical (H/V) de la onda de corte ya que considera que solo la componente horizontal del movimiento es afectada por las condiciones locales del suelo.

Para calcular las FTE con los datos sísmicos a través de la técnica de Nakamura (HVSR), se empleó la misma metodología utilizada en registros de microtemores.

Lermo y Chávez García (1993) al evaluar esta técnica concluyeron que los resultados del valor de la frecuencia y amplitudes de resonancia son semejantes a las obtenidas con la SSR. Al igual que la técnica anterior, ésta requiere de una geología relativamente simple.



#### 6.4 Determinación de familias (función de transferencia empírica promedio) de acuerdo a la forma espectral.

A medida que se analizaron las 228 FTEP obtenidas de registros de microtemores se clasificaron en tres grupos, de acuerdo al rango de frecuencia en que se presenta la máxima amplitud de onda (Tabla 26).

Tabla 26. Clasificación de la FTEP de acuerdo a la forma espectral que presentan.

ZONA	FRECUENCIA [Hz]
Firme	-----
Moderada	3-10Hz.
Blanda	1-3 Hz

ZONA FIRME. Los promedios de la FTEP no muestran ningún máximo espectral notorio, y en algunos casos se observa un decaimiento en la razón espectral (Figura 25).

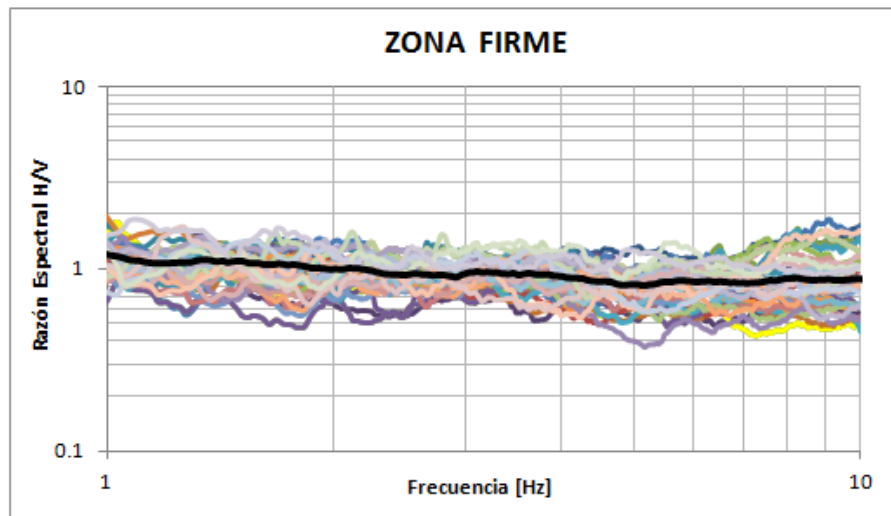


Figura 25. Zona Firme: Promedio de las FTEP (línea gruesa), FTEP (líneas delgadas).

Para la zona denominada como ZONA MODERADA se agruparon los promedios de las FTEP que presentan como característica común un máximo espectral alrededor de la frecuencia de 3.5 Hz (Figura 26).

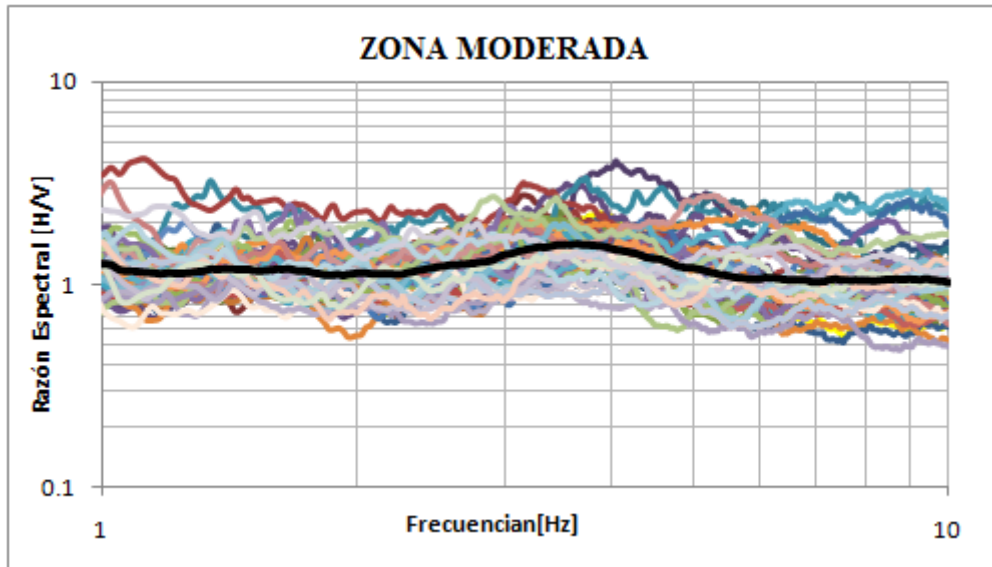


Figura 26. Zona Moderada: Promedio de las FTEP (línea gruesa), FTEP (líneas delgadas) que presentan su máximo espectral alrededor de 3.5 Hz.

Para finalizar la tercera zona se nombró como ZONA BLANDA en la que se agruparon los promedios de las FTEP que presentan como característica común un máximo espectral alrededor de la frecuencia de 2.5 Hz (Figura 27).

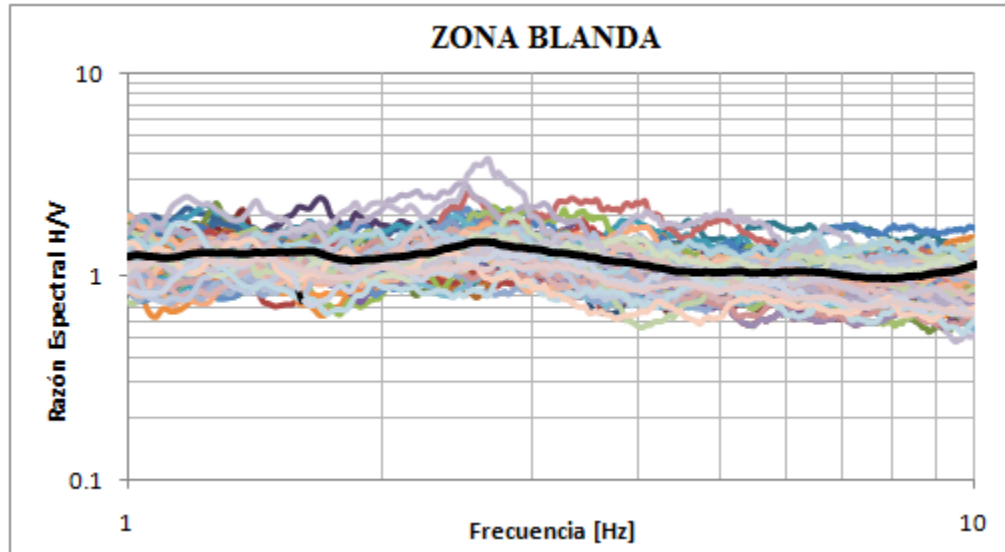


Figura 27. Zona Blanda: Promedio de las FTEP (línea gruesa), FTEP (líneas delgadas) que presentan su máximo espectral alrededor de 2.5 Hz.

### 6.5 Determinación del periodo dominante de vibración del suelo.

Para identificar la distribución del periodo dominante de vibración del suelo, es necesario generar curvas de isoperiodos. La metodología para la elaboración de curvas de isoperiodos es la siguiente:

- a) Localización de los 228 sitios de medición en un Sistema de Información Geográfica (SIG) utilizando el software ArcMap, versión 9.3.
- b) Interpolación de los períodos dominantes obtenidos en cada punto de medición mediante el método de geo-estadística Kriging cuya teoría establece que una variable sigue un mismo patrón dentro de un área determinada. El resultado de esta interpolación permite desplegar la influencia de los datos obtenidos sobre un cierto entorno a una determinada distancia.
- c) Digitalización de las zonas sísmicas que presentan el mismo comportamiento dinámico del suelo.

- d) Elaboración de una base de datos que contenga las coordenadas (UTM) y el valor del periodo de la periferia de cada zona sísmica.
- e) Generación de curvas de isoperiodos<sup>1</sup> utilizando el programa Sorfer versión 8 mediante la aplicación del método estadístico de interpolación Kriging (Figura 28) al valor del periodo correspondiente a cada punto geográfico.

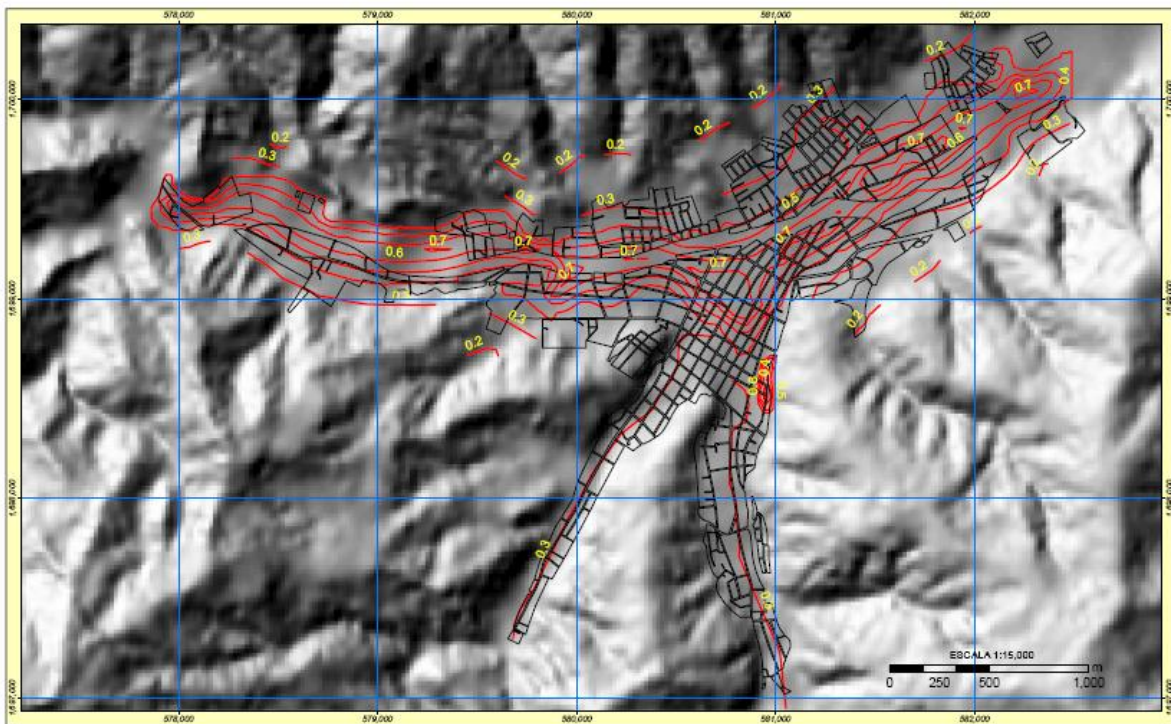


Figura 28. Curvas de isoperiodos.

<sup>1</sup> Las curvas de isoperiodos y la clasificación sísmica de la zona urbana de Motozintla en donde no fue posible realizar mediciones de la vibración del suelo, fueron definidas al considerar una alta probabilidad de que las áreas con una geología similar deben presentar la misma respuesta sísmica.