

COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE SITIO ESPECÍFICO OBTENIDOS A PARTIR DE SISMOS REALES Y APLICANDO LA NORMATIVA MOC-CFE2008 PARA LA CIUDAD DE COLIMA, MÉXICO

Héctor E. Rodríguez Lozoya¹, Tonatiuh Domínguez Reyes², Carlos I. Huerta López³, Armando Aguilar Meléndez⁴, Eva Sánchez Sánchez³, Mario Cabrera Sandoval³, Juan Tejeda Jácome³ y Edén Bojórquez Mora²

Resumen: Se realizaron mediciones de ruido sísmico en 9 puntos de la ciudad de Colima, mediante arreglos lineales de estaciones. Se analizaron usando la técnica de auto-correlación espacial (SPAC; Aki, 1957), mediante la cual se obtuvieron curvas de dispersión de ondas de Rayleigh, las cuales se invirtieron para obtener perfiles unidimensionales de velocidades de onda de corte. Se estimaron las funciones de transferencia tanto para los perfiles obtenidos en este estudio, como para los obtenidos por Chávez et al. (2007). Se estimaron periodos naturales de vibración y se compararon con los obtenidos mediante PRODISIS del Manual de Obras de Construcción (MOC-2008) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Se correlacionan los periodos naturales de vibración obtenidos en el presente estudio con la geología local. Se obtuvieron señales en superficie usando los registros de 2 sismos grandes ocurridos en la zona de subducción como funciones de Green y propagándolas verticalmente por cada perfil. Se estimaron los espectros de respuesta en todos los sitios y se compararon con los espectros de diseño calculados según la normativa MOC-2008, pues dicha norma es comúnmente usada en proyectos de construcción en México. Los resultados muestran que los espectros de diseño en todos los casos tienen zonas (periodos cortos) con amplitudes menores respecto a las obtenidas para los espectros de respuesta calculados mediante registros de sismos reales.

Palabras clave: amplificación dinámica, curva de dispersión, efecto de sitio, espectros de sitio específico, velocidad de onda de corte.

COMPARISON OF SITE SPECIFIC SPECTRA OBTAINED FROM REAL EARTHQUAKES AND FROM THE MOC-CFE2008 REGULATIONS FOR THE CITY OF COLIMA, MEXICO

Abstract: We performed array measurements of microtremors. We used linear arrays at nine sites within Colima city, which were analyzed with spatial autocorrelation technique (SPAC; Aki, 1957). The result of the analysis is a Rayleigh phase-velocity dispersion curve for each site, which were inverted to obtain a shallow S-wave velocity profiles. We estimated Transfer Functions (FT) for the obtained profiles in this study as well as for those profiles estimated by Chávez et al. (2007). Dominant period at each site is estimated. These results were compared with those obtained using the PRODISIS software, which is part of the seismic design buildings Handbook (MOC-2008) of the Federal Commission of Electricity (CFE). We correlated the natural periods estimated in the present study with local geology. Surface records were estimated by using the records of two great subduction zone earthquakes as Green functions to vertically propagate them through the profiles. We calculated response spectra and compared with design spectra calculated according to MOC-2008 which is widely used as reference on

¹ Universidad Autónoma de Sinaloa, México. E-mail: rolohe@uas.edu.mx

² Universidad de Colima, México. E-mail: tonatiuh@uacol.mx

³ Catedrático Asociado, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, Puerto Rico. Profesor auxiliar, Instituto Tecnológico de Tijuana, Baja California, México. E-mail: m-huerta@alumni.utexas.net, carlos.huerta@upr.edu

⁴ Universidad Veracruzana, Veracruz, México.

construction projects in Mexico According to the results, the design spectra have zones where amplitudes are smaller (short periods) than the amplitudes of the response spectra obtained using real records of earthquakes.

Keywords: dispersion curve, dynamic amplification, shear wave velocity, site effect, specific site spectra.

INTRODUCCIÓN

Son diversos los factores que determinan que en un edificio sometido a movimientos sísmicos se presenten daños o no, y de qué magnitud. Para tener mayores probabilidades de que el edificio no sufra daños o que los daños no representen un riesgo de vida de sus ocupantes, es necesario realizar una estimación razonable de la acción sísmica que puede afectar al edificio, y del comportamiento que puede tener el mismo edificio ante la presencia de la acción sísmica referida. Por tal motivo, se reconoce que la estimación del efecto de sitio es fundamental para tener estimaciones más apropiadas de la acción sísmica. El efecto de sitio se debe a la presencia de suelos blandos o suaves. Esta propiedad del suelo, es la causa principal del fenómeno de amplificación de las ondas sísmicas, dicha amplificación se presenta en una banda de frecuencias en la que se incluye la frecuencia fundamental del suelo en el sitio, cuando esta última frecuencia es cercana o similar al de la estructura se presenta el fenómeno de la resonancia. El efecto de sitio aumenta la demanda a las estructuras, y si dichas estructuras no tienen la capacidad de soportar dicha exigencia, estas pueden tener fallas de consideración o en el caso extremo llegar al colapso.

Ejemplos notables del daño por el efecto local de sitio y en el cual se produjo resonancia entre el suelo y las estructuras, se dieron en la Ciudad de México durante el terremoto de 1985. La aceleración en algunas zonas de la Ciudad de México fue varias veces mayor al de zonas ubicadas a la misma distancia del epicentro, pero sobre suelo firme (Grajales, 2003).

Para diseñar edificios capaces de soportar en forma adecuada el efecto de sitio, mismo que la señal sísmica adquiere al propagarse a través del suelo, es necesario hacer estimaciones razonables de dicho efecto. Para tal fin, es indispensable conocer las propiedades dinámicas del suelo, lo cual a su vez permite estimar su respuesta cuando éste es sometido a sismos o cargas dinámicas. Por tal razón, es recomendable que se sigan realizando estudios en las principales ciudades de México con el objetivo de realizar estudios para determinar los efectos de sitio o para actualizar la información de los efectos de sitio estimados previamente. Los resultados de dichos estudios deben contribuir a la actualización de las normas de análisis y diseño sísmico de edificios en las diferentes regiones de México.

La ciudad de Colima se encuentra asentada en una meseta al sur del complejo volcánico de Colima cuya actividad se ve reflejada en la existencia de cañones y valles formados por avalanchas, lahares y diversos depósitos volcánicos que subyacen a la ciudad. Por otro lado, debido a su cercanía a la zona de subducción, se ha visto afectada en repetidas ocasiones por grandes sismos como los de 1932, 1941, 1973, 1995 y recientemente el de 2003 que han causado daño considerable a la infraestructura urbana en la zona de estudio. La localización de los sismos mencionados así como las estructuras geológicas y sistemas de fallas tectónicas en la región se ilustra en la Figura 1.

A raíz del sismo de 1985, se realizaron una serie de estudios de zonificación sísmica en diversas ciudades del país. En el caso de Colima Lermo et al. (1991) y Gutierrez et al. (1996), estimaron los periodos dominantes usando la técnica de razones espectrales pero obtuvieron resultados contradictorios en el mapeo de periodos dominantes. Chávez et al. (2007) hicieron lo propio y concluyeron que cuando la geología es tal que no existen contrastes notables de impedancia, la técnica de H/V (Nakamura, 1989), con mediciones de ruido usando una estación no ofrece una alternativa confiable en la estimación de efectos de sitio. Además de las mediciones con una sola estación por sitio, ellos usaron arreglos de estaciones para obtener perfiles de velocidades en 8 sitios dentro de la ciudad, y a partir de estos perfiles calcularon las funciones teóricas de transferencia, y las compararon con las estimaciones de amplificación obtenidas usando registros de temblores.

En el presente trabajo se realizaron mediciones multicanal de vibración ambiental, en nueve sitios de la ciudad de Colima. Se aplicó el método de auto-correlación espacial (SPAC) para estimar curvas de dispersión y se invirtieron dichas curvas para obtener perfiles de velocidad de onda de corte. Usando tanto los perfiles de velocidad obtenidos en este estudio (9 perfiles), como los obtenidos por Chávez et al. (2007) (8 perfiles), se calcularon las funciones de transferencia, los periodos dominantes y las velocidades promedio. Adicionalmente, se estimaron los espectros de sitio específico en cada sitio aplicando la normativa MOC-CFE2008, y a partir de la propagación de

registros de sismos reales, se obtuvieron los espectros de respuesta al 5% de amortiguamiento crítico. Se realizó una comparación entre las ordenadas espectrales de estos últimos, y los espectros propuestos por la normativa mencionada.

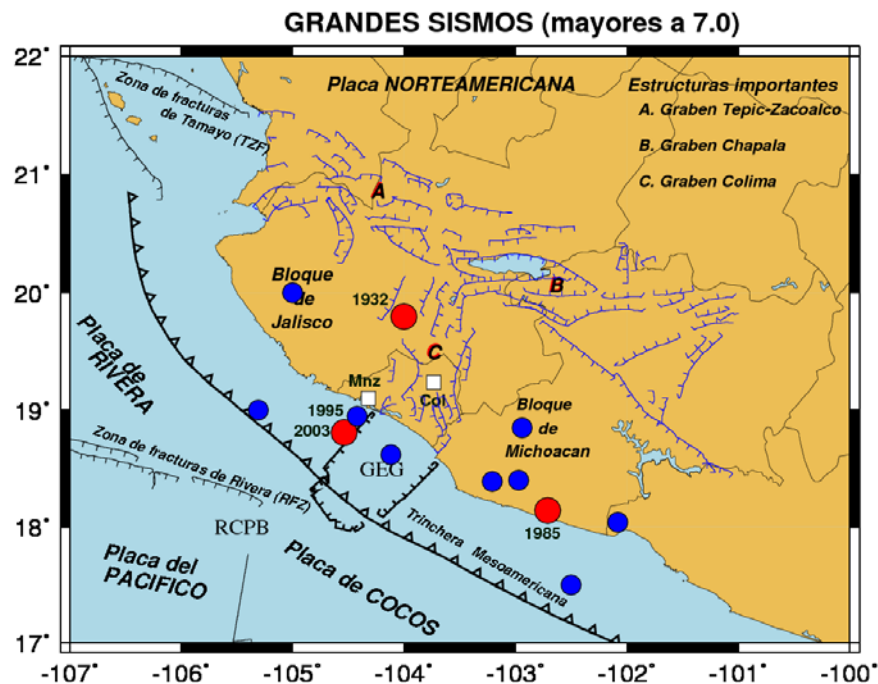


Figura 1: Tectónica regional de la zona de estudio. Los círculos indican epicentros de sismos $M > 7.0$ en la zona desde 1900. Los círculos mayores indican epicentros de sismos con magnitud mayor a 8.0. Los epicentros de los sismos de 1995 y 2003 indicados en la figura, corresponden a los sismos empleados en el presente estudio.

GEOLOGÍA

La ciudad de Colima se localiza 32 km al sur del Complejo Volcánico de Colima (CVC), que a su vez forma parte del Eje Volcánico Mexicano. El CVC consta de 3 estrato-volcanes andesíticos (dos de ellos extintos y uno activo), con una orientación norte-sur resultado de la migración de la actividad volcánica, debida a la subducción de la placa oceánica del pacífico debajo de la continental de Norteamérica. La ciudad está construida sobre depósitos del CVC los cuales a su vez sobreyacen a un basamento de calizas de edad cretácica que aflora al este y oeste de la ciudad. Las secuencias volcánicas presentes debajo de la ciudad, incluyen materiales de diferentes edades procedentes de diferentes procesos de depósito. Los geólogos han mapeado 3 grandes tipos de depósitos en la ciudad (Cortes et al., 2005), los cuales se describen enseguida.

Depósitos de avalancha de escombros

Producidos por colapso parcial del edificio volcánico, consisten de rocas andesíticas de tamaños de entre 5 cm y 1 m de diámetro, dentro de una matriz de arcilla y arena. El espesor total de las diferentes secuencias es de alrededor de 600 m y domina la parte norte y noreste de la ciudad.

Depósitos de flujo de escombros

Producidos por la removilización de depósitos volcánicos de avalancha por flujos de agua. Consisten de bloques redondeados en una matriz arenosa. Se encuentran en la parte sur de la ciudad y sus espesores son de 20 a 30 m.

Lahares y depósitos lacustres

Material volcánico no consolidado transportado por los flujos de agua. Se presenta como depósitos estratificados de bloques andesíticos dentro de una matriz arenosa. Sus espesores son de alrededor de 50 m presentes en la parte

oeste de la ciudad.

La descripción geológica anterior del suelo de Colima, es una muestra de su complejidad lo que no permite una caracterización precisa para poder ser modelado con fines de estimar los efectos de sitio locales.

PROCESADO DE PERFILES DE VELOCIDADES

Con el fin de estimar la estructura de velocidades bajo la superficie se usó un equipo multicanal empleado comúnmente en exploración geofísica. La fuente utilizada fue el ruido ambiental. La premisa básica para el análisis es considerar que la componente vertical de la vibración ambiental está compuesta predominantemente de ondas Rayleigh, lo cual implica que dichas ondas tienen la propiedad de dispersión.

El método de SPAC original fue propuesto por Aki (1957). Él demostró que los coeficientes de correlación $\rho(r, \omega)$, como función de la frecuencia, entre una estación central y varias estaciones alrededor a la misma distancia, pueden expresarse mediante:

$$\rho(r, \omega) = \frac{1}{2\pi\varphi(r=0, \omega)} \int_0^{2\pi} \varphi(r, \theta, \omega) d\theta = J_0 \left(\frac{r\omega}{c(\omega)} \right) \quad (1)$$

Donde $\varphi(r=0, \omega)$ es el promedio de la función de auto-correlación en la estación central y $\varphi(r, \theta, \omega)$ es la función de correlación entre la estación central y la estación en la posición (r, θ) , $c(\omega)$ es la velocidad de fase a la frecuencia ω del sitio y J_0 es la función de Bessel de primera clase y orden cero. El único factor desconocido es la velocidad de fase, que se puede obtener calculando por un lado los coeficientes de correlación, y por otro aplicando la ecuación (1).

Más recientemente, Chávez-García et al. (2005), probaron que el sustituir el promedio temporal por el acimutal arroja resultados similares, con la ganancia de que pueden usarse geometrías diferentes a la circular. En este estudio se empleó la técnica de SPAC con promedios temporales, y arreglos lineales para los 9 sitios establecidos en el presente estudio y mostrados en la Figura 2. Para las mediciones se empleó un equipo *Geometrics* consistente de 24 sensores verticales, con una separación de 4 m entre sensores. Se registraron 5 ventanas de 1 minuto en cada sitio.

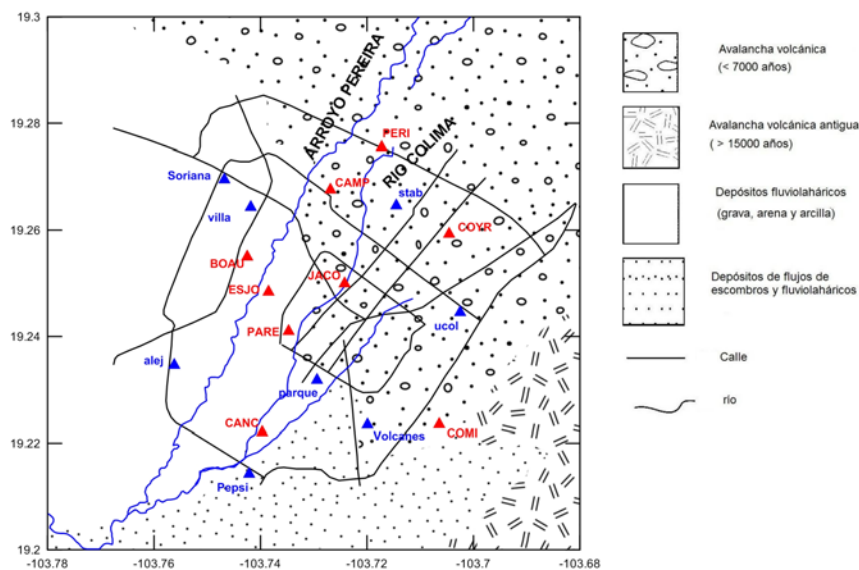


Figura 2: Geología de la ciudad de Colima y sitios de medición. Los triángulos indican los sitios de medición multicanal de ruido ambiental. Los 9 sitios marcados con letras mayúsculas corresponden a este estudio, mientras que los 8 sitios marcados con minúsculas corresponden a Chávez et al. (2007). Las capas de líneas sobre el mapa representan caminos o arroyos sobre la ciudad.

El proceso consiste en apilar las señales de las diferentes ventanas (Figura 3a), y aplicar la ecuación (1), para encontrar la velocidad de fase, esto es, construir la curva de dispersión para un rango de frecuencias que depende de

la longitud del arreglo, la Figura 3b muestra las curvas de dispersión de todos los sitios en estudio. Puede observarse que las curvas de dispersión se definen bien para la mayoría de las estaciones en el rango de 2 a 16 Hz (la estación PERI se excluyó del análisis dado que su curva de dispersión no pudo ser bien definida).

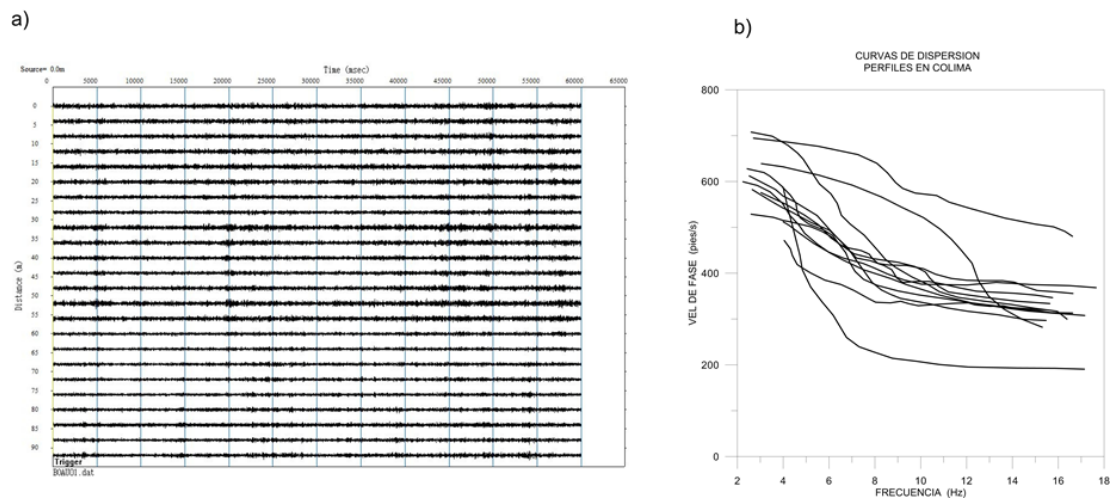


Figura 3: (a) Señales apiladas de 24 canales de las 5 ventanas de 1 minuto registradas. (b) Curvas de dispersión estimadas para los sitios de medición, mediante la aplicación de la ecuación (1).

La estructura vertical de velocidades puede estimarse a partir de la inversión de la curva de dispersión, obtenida aplicando algún algoritmo estándar. En esta investigación se aplicó el algoritmo de Herrmann en el cual, la inversión no lineal es remplazada por un procedimiento de mínimos cuadrados estocástico (Herrmann, 1987). De esta forma se obtuvo la variación de la velocidad de la onda de corte con la profundidad. La Figura 4 nos muestra el resultado de la inversión del modelo de velocidades, a partir de la curva de dispersión. Los perfiles de velocidades se extienden hasta 60 metros debido al rango de frecuencias en que fue posible definir las curvas teóricas de dispersión. Dicha figura ilustra la no unicidad de la inversión. En la Figura 4a), se muestran 10 modelos diferentes obtenidos a partir de la misma curva de dispersión (mostrada con círculos en la Figura 4b). La Figura 4b muestra las curvas teóricas calculadas a partir del modelo obtenido de la inversión. Puede observarse que el ajuste de cada curva teórica con respecto a la curva de dispersión observada puede extenderse de manera aceptable hasta 2 Hz.

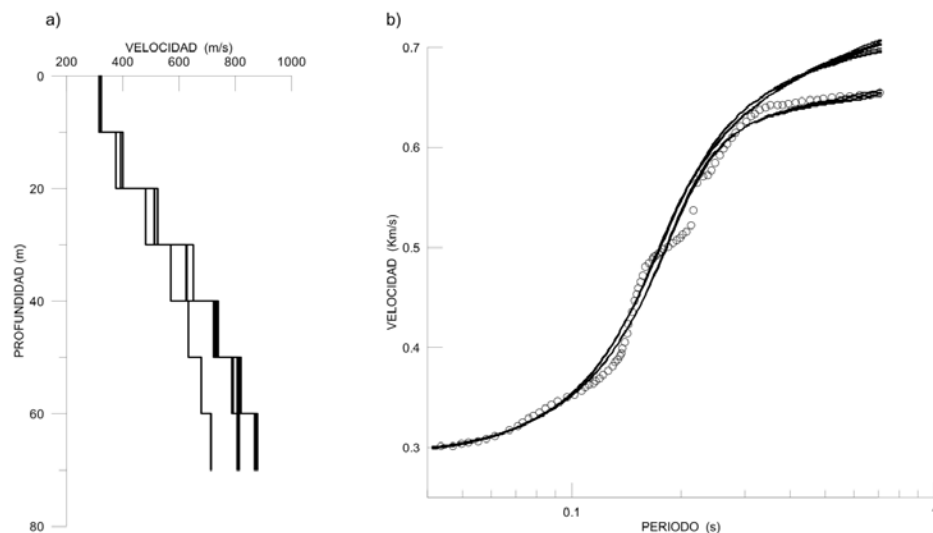


Figura 4: (a) Modelos de velocidad obtenidos a partir de la curva de dispersión. (b) Curvas teóricas de dispersión a partir del modelo de velocidades. Los círculos indican la curva de dispersión observada.

Para estimar el modelo final en cada sitio, se promediaron los 3 mejores modelos obtenidos del proceso de

inversión. Con fines de calibración se estimó el perfil en el sitio *ucol* de Chávez et al. (2007) los perfiles son similares. La Figura 5 muestra los perfiles de velocidad finales de los 9 sitios estimados en el presente estudio.

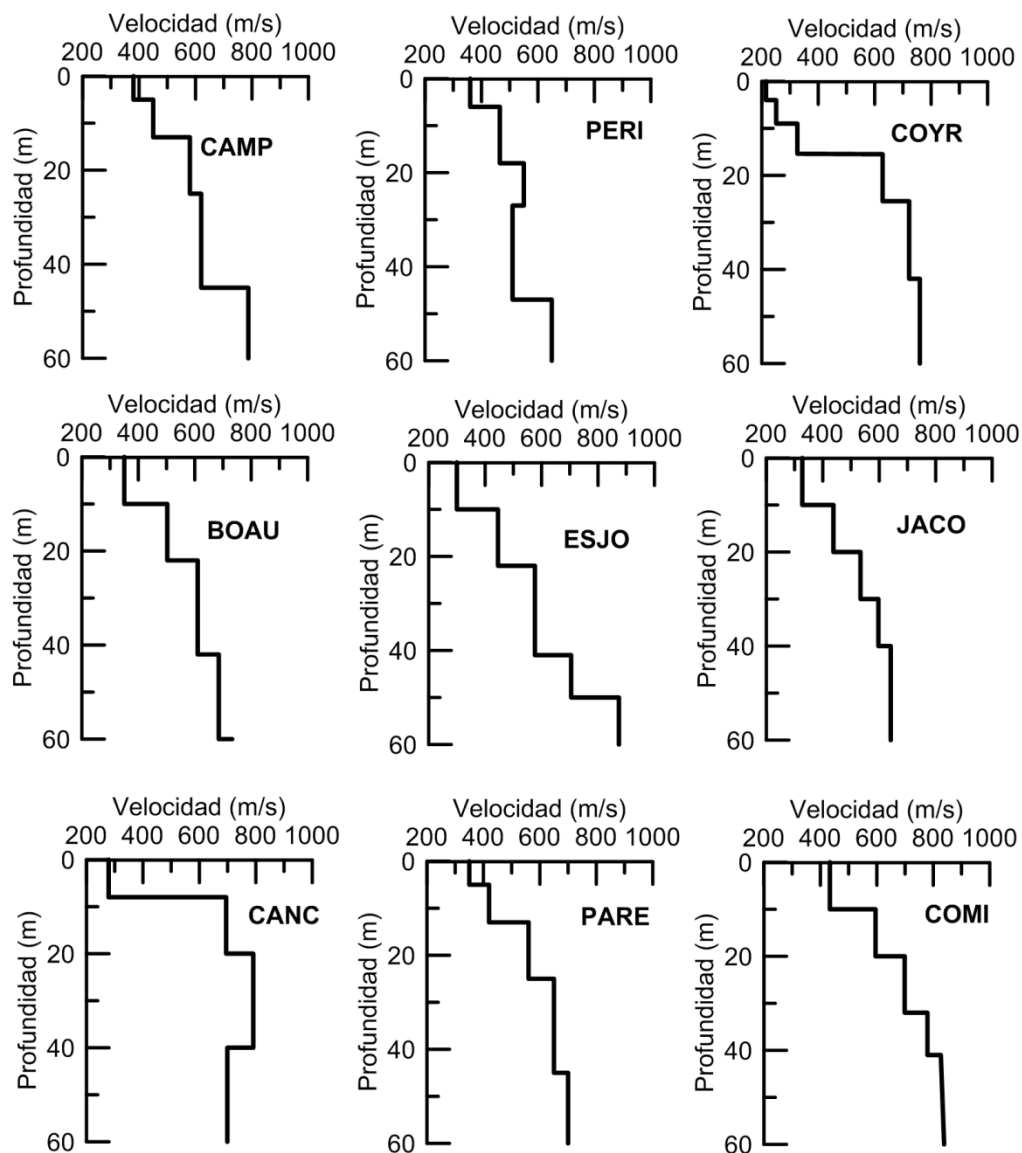


Figura 5: Modelos de velocidades estimados para cada uno de los 9 sitios en la ciudad de Colima (este estudio).

La menor velocidad en la capa superficial fue de 220 m/s en el sitio COYR, donde aflora la avalancha volcánica. Dicha velocidad corresponde, según IBC (2006) con un suelo tipo D, (velocidades de onda de corte de entre 180 y 360 m/s), y puede ser considerado como un suelo de consistencia suave a intermedia. De este perfil puede observarse un alto contraste de velocidades alrededor de los 15 metros de profundidad; algo similar se presenta en el sitio CANC, en los sitios aquí mencionados fue donde fueron estimadas la más altas amplificaciones (Figura 7 y Tabla 1).

La mayor velocidad estimada para las capas más profundas fue en los sitios COMI (830 m/s) y ESJO (900m/s) para una profundidad de 60 metros en ambos sitios. El comportamiento de la velocidad en las capas superiores es diferente. ESJO tiene velocidades en el intervalo de 300 a 650 m/s mientras que para COMI el intervalo es de 430 a

800 m/s. La velocidad promedio en ESJO es de 404.4 m/s mientras que para COMI es de 553.2 m/s. Cuantitativamente ambas velocidades podrían considerarse similares, pero por un lado ESJO se localiza en la zona considerada como de transición y COMI en la zona de avalanchas o zona dura, de lo anterior se esperaría una diferencia notable entre los periodos en ambos sitios y de la Tabla 1 puede obtenerse que la variación es de 0.11 segundos, lo anterior es una evidencia más de la complejidad del suelo existente en la ciudad de Colima. Según las características descritas del suelo en ambos sitios, este corresponde a un suelo tipo A o B (IBC, 2006), es decir, en estos sitios, el suelo puede ser considerado como muy rígido o roca erosionada.

En general el comportamiento de la velocidad en los sitios estudiados, sigue un patrón de variación normal, es decir aumenta con la profundidad, salvo en el sitio denominado CANC, donde ocurre una ligera inversión de velocidades en una profundidad aproximada a los 45 metros. De la Figura 5 es posible observar que la mayoría de los sitios tienen una velocidad de onda de corte del orden de entre 700 y 900 m/s a una profundidad de 60 metros. Dicha velocidad corresponde a un tipo de suelo muy firme, lo que puede ser interpretado como roca sana, la ciudad de Colima está asentada como ya se había mencionado, sobre depósitos volcánicos removilizados (lahares y avalanchas).

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA Y PERIODOS FUNDAMENTALES DE VIBRACIÓN

Con fines de modelado, el efecto de sitio causado por una estructura de suelo, puede considerarse como el resultado de la convolución de la energía (eg. energía sísmica), que viaja por la estructura, y la respuesta propia del sitio llamada función de transferencia. Si las características del suelo son conocidas (la estructura del suelo), se puede estimar la función de transferencia del sitio, y obtener una respuesta teórica total dada cualquier señal de entrada mediante la propagación de ésta (función de Green) a través del medio.

Existen varias formas de describir un medio en función de sus propiedades elásticas: medio homogéneo, medio estratificado, medio heterogéneo, etc. En este estudio describiremos el medio como estratificado con capas planas horizontales, caracterizadas por espesor h , densidad ρ , módulo de corte G y factor de amortiguamiento D .

Para caracterizar el comportamiento del suelo al obtener la función de transferencia, se pueden emplear metodologías en las que se considera que este se comporta linealmente o bien no lineal. Dentro de las metodologías más utilizadas para suponer un comportamiento lineal del suelo, están el método de la matriz de transferencia planteado originalmente por Thomson (1950) y corregido por Haskell (1953). El software Degtra (Ordaz, 1988) y el Proshake (EduPro, 2001) utilizan esta metodología de Thomson-Haskell para determinar la Función de Transferencia.

Algunos métodos utilizados, cuando se considera el comportamiento no lineal del suelo se describen en Kramer (1996) uno de estos métodos es el llamado método lineal equivalente, el cual tiene en sus bases en el método lineal, pero incorpora la no linealidad del suelo empleando en su proceso propiedades compatibles con los niveles de deformación de cada capa del perfil de suelo en estudio. Para lo anterior son utilizadas curvas de variación G y D (módulo de corte y razón de amortiguamiento respectivamente), como función de la deformación angular del suelo. Existen curvas propuestas para diferentes tipos de suelo (Vucetic y Dobry, 1991; Seed e Idriss, 1970). En este método las propiedades del suelo (amortiguamiento viscoso y módulo de corte), se ajustan mediante procesos iterativos hasta obtener un nivel efectivo de deformación inducido por las cargas al suelo. El complejo suelo debajo de Colima (avalanchas volcánicas y depósitos fluviolaháricos), sin embargo, no se ajusta a ninguno de los suelos para los que existen curvas de variación G y D , por lo que los efectos no lineales no pueden ser introducidos de manera realista. La determinación de las funciones de transferencia por tanto, se restringió a una respuesta lineal de un modelo unidimensional y propagación vertical. Las funciones se obtuvieron de manera independiente usando de manera independiente: ProShake (EduPro, 2001) y Degtra V8.3 (Ordaz, 1988). Ambos paquetes dieron resultados similares.

La función de transferencia en cada sitio se estimó usando el perfil de velocidades correspondiente (Figura 5). Para las capas más superficiales fue considerado un amortiguamiento del 5% y para las capas intermedias y

profundas este parámetro fue variado a 4 y 2 % respectivamente. La densidad en cada capa se consideró de 1800 kg/m³.

La Figura 6 ilustra las funciones de transferencia obtenidas para los 17 sitios analizados en el presente estudio (los 8 primeros corresponden a los perfiles obtenidos por Chávez et al. (2007) y el resto a los perfiles obtenidos en este estudio y mostrados en la Figura 5). Se puede observar un factor de amplificación promedio de 1.6 y una frecuencia fundamental promedio de 5.8 Hz (0.17 segundos). La mayor contribución de energía corresponde al modo fundamental de vibración (la contribución de los modos superiores es despreciable).

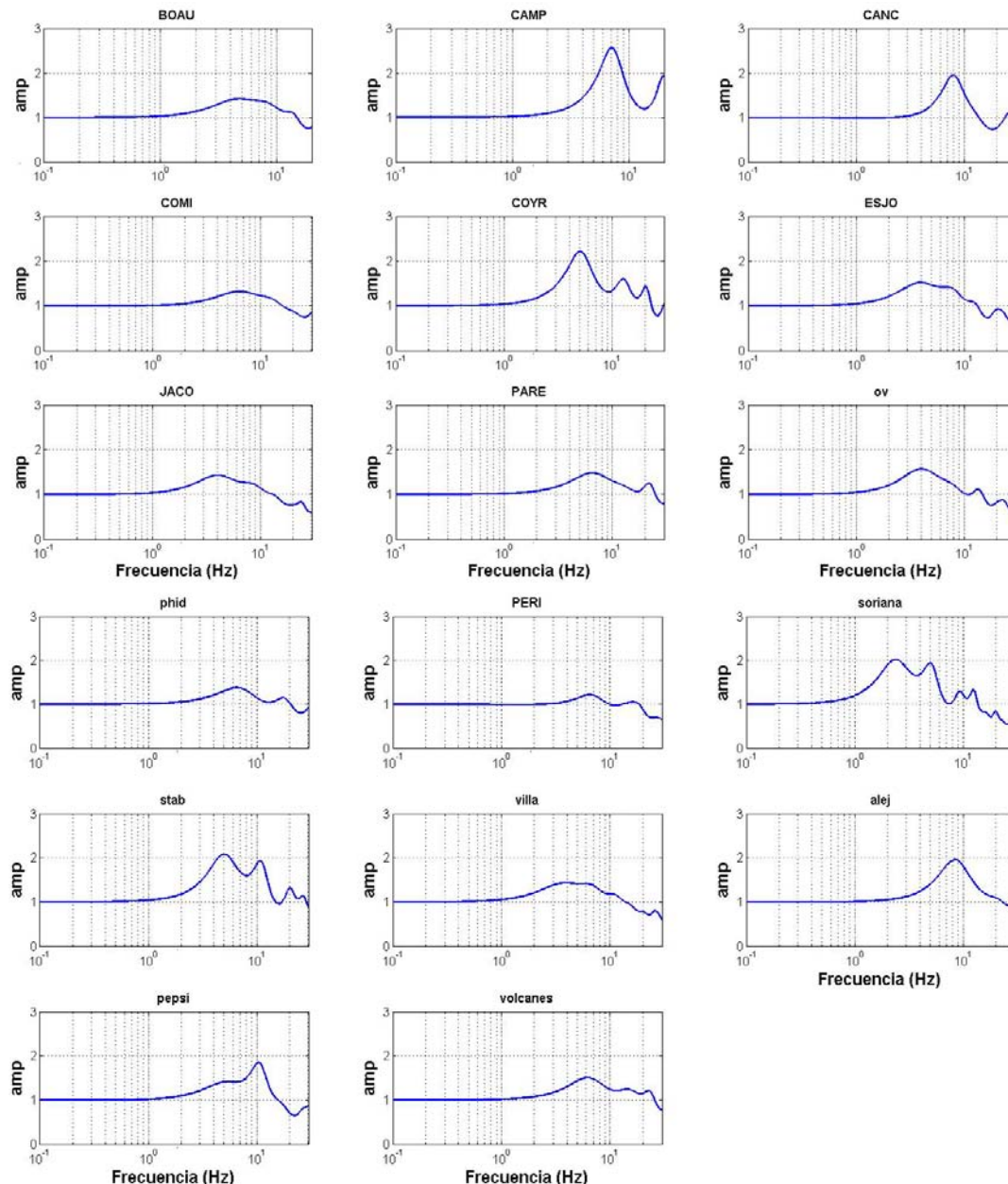


Figura 6: Funciones de transferencia para los 18 sitios en la ciudad de Colima. Los nombres en minúscula corresponden a los perfiles estimados por Chávez et al. (2007). Los nombres en mayúsculas corresponden a los perfiles estimados en este estudio.

Es importante resaltar que la función de transferencia obtenida es reflejo de las características elásticas del suelo

y no de la señal que se propaga por él.

El Manual de Diseño por Sismo de la CFE (2008), incluye un paquete computacional llamado PRODISIS que realiza diferentes cálculos, entre ellos periodos de sitio, velocidad de onda de corte en el sitio a cualesquier profundidad (V_s), y espectro de diseño sísmico para roca o bien considerando las capas del suelo en el sitio para un periodo de retorno específico. Dado que las normas descritas en dicho manual se emplean en muchos proyectos de construcción en México, donde no se tiene un código de diseño sísmico propio, se consideró conveniente comparar los resultados obtenidos en el presente estudio, con los que se obtienen al aplicar la metodología descrita en dicho manual. En dicho manual para estimar el periodo natural de vibración del suelo utilizando la geometría de los estratos, el módulo de rigidez y el peso volumétrico se utiliza la siguiente expresión (Gómez, 2000):

$$T_s = \frac{4}{\sqrt{g}} \sqrt{\left(\sum_{n=1}^N \frac{h_n}{G_n} \right) \left(\sum_{n=1}^N \gamma_n h_n (w_n^2 + w_n w_{n-1} + w_{n-1}^2) \right)} \quad (2)$$

Donde γ_n , G_n , h_n son el peso volumétrico, el módulo de corte y el espesor del n -ésimo estrato respectivamente, g es la aceleración de la gravedad, N es el número de estratos y w_n es un factor de peso que depende del espesor, la velocidad de onda de corte y del peso volumétrico de cada estrato. Otra forma de obtener el periodo en el sitio, es directamente de su función de transferencia a partir de su frecuencia fundamental. En este estudio fueron utilizadas ambas formas para poder comparar los resultados así obtenidos, los periodos dominantes obtenidos se resumen en la Tabla 1.

Además en PRODISIS también pueden ser obtenidos la aceleración máxima en la roca (a_{or}), y en la superficie del depósito de suelos (a_o), el factor de amplificación entre la aceleración en la superficie y en la roca (F_s), y el coeficiente sísmico (c). Para encontrar la aceleración, velocidad y desplazamiento máximo en la roca es necesario proporcionar las coordenadas geográficas del sitio (longitud y latitud), y para el espectro sísmico se necesita conocer el perfil de velocidad de onda de corte (V_s), y densidad contra profundidad, hasta llegar a la roca basal.

Una limitante de esta excelente herramienta es que no permite el uso de suelos compuestos como por ejemplo, suelo arcillo-limoso a arena-limosa, o semejantes ya que sólo pueden ser introducidos perfiles de suelos denominados rocosos, granulares y arcillosos. Además de que no permite estratos de suelo con velocidad de onda de corte mayor a 750 m/s ya que te indica que solo para la roca base puede ser considerada dicha velocidad. La diferencia entre los periodos respectivos estimados con la mediciones y en PRODISIS puede deberse a las limitaciones ya mencionadas en dicha herramienta.

La Tabla 1, resume las características dinámicas para cada sitio estudiado, la velocidad de onda de corte y los periodos de sitio obtenidos a partir de las funciones de transferencia, y según el criterio de MOC-CFE2008.

De los perfiles se obtuvo una velocidad de onda de corte promedio ponderada para los primeros 60 m de profundidad. La distribución geográfica de esa velocidad se muestra en la Figura 7. La velocidad más alta se encontró en el sitio volcanes, que está localizado en la zona de transición, entre flujo de escombros y avalancha volcánica.

Velocidades arriba de 600 m/s se encontraron en 3 estaciones ubicadas en la zona de depósitos fluviolaháricos (bloques andesíticos dentro de una matriz arenosa). La más baja velocidad se encontró en 2 sitios: uno sobre los depósitos de flujo de escombros (bloques redondeados en una matriz arenosa), al suroeste de la ciudad y otro sobre los depósitos fluviolaháricos. Los sitios ubicados sobre los depósitos de avalancha muestran velocidades entre 400 y 571 m/s. Lo anterior muestra de manera general que la V_{s30} en la ciudad de Colima está en el rango de 400 a los 600 m/s.

La Figura 8 muestra una comparación de los periodos obtenidos usando ambos métodos: Funciones de Transferencia y Gómez, 2000 (MOC-2008).

Tabla 1: Características principales del suelo en cada uno de los 17 sitios estudiados en el presente trabajo: velocidad de onda de corte y su periodo de vibración, obtenida tanto mediante funciones de transferencia como a través del criterio del MOC-CFE2008.

Sitio	Frecuencia (Hz.)	VS (m/s))	Ts (MOC-CFE2008)	Ts(FT) MEDICIONES
pepsi	10.0	474.8	0.22	0.10
ucol	4.0	569.0	0.38	0.25
volcanes	6.2	590.8	0.15	0.16
soriana	2.4	544.0	0.5	0.41
Stab	5.0	578.1	0.24	0.20
Alej	8.4	491.4	0.21	0.12
parque	6.5	450.0	0.30	0.15
villa	3.9	519.2	0.40	0.25
BOAU	4.7	457.4	0.37	0.21
CAMP	7.1	502.6	0.28	0.14
CANC	7.9	510.9	0.33	0.13
COMI	6.4	553.2	0.30	0.16
COYR	5.0	378.1	0.22	0.20
ESJO	3.9	404.4	0.41	0.25
JACO	4.0	415.3	0.40	0.25
PARE	6.5	480.3	0.29	0.15
PERI	6.5	536.1	0.44	0.15

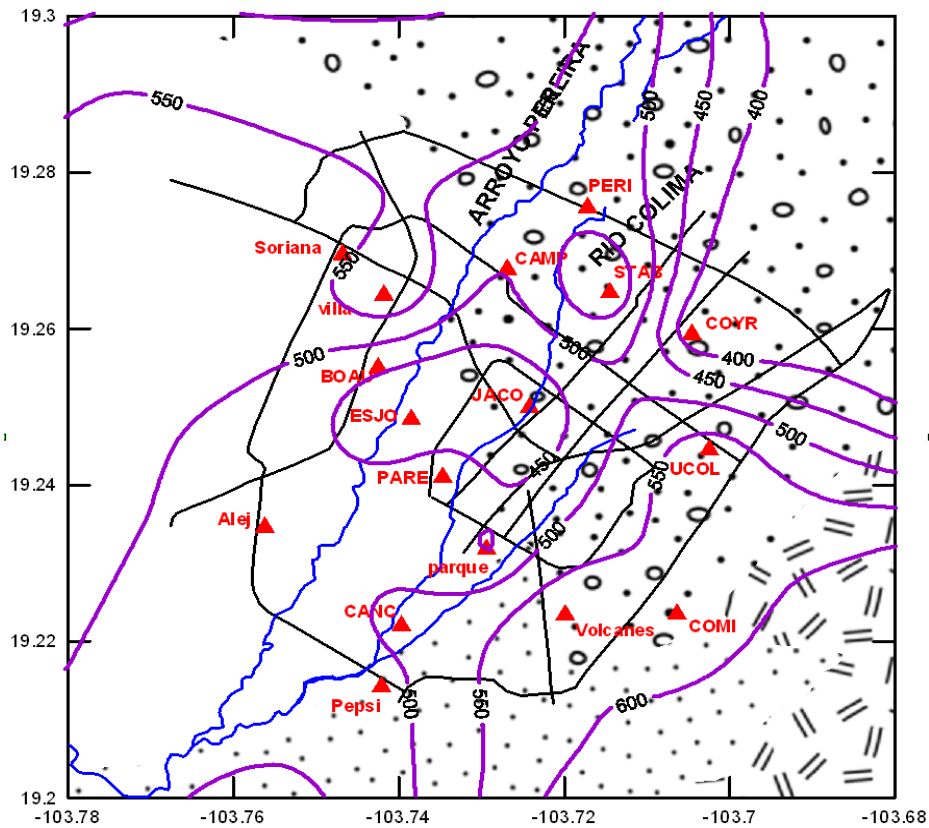


Figura 7: Distribución de velocidad de onda de corte para la ciudad de Colima.

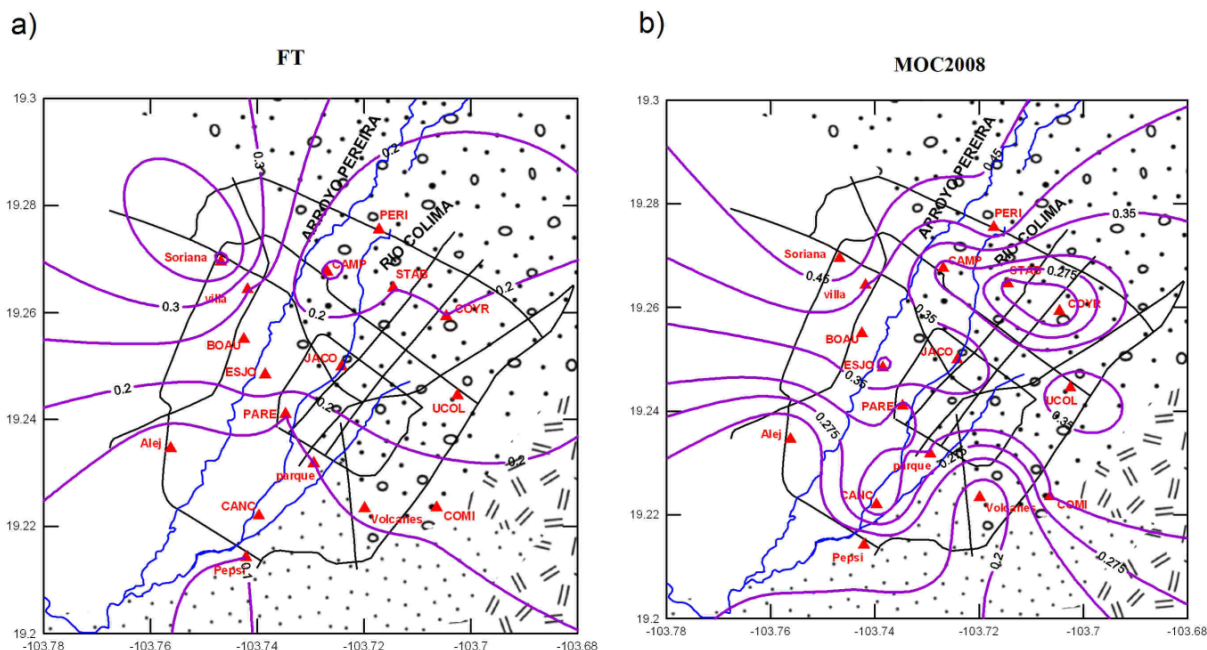


Figura 8: Mapa de isoperiodos para la ciudad de Colima: (a) Periodos obtenidos a partir de la función de transferencia (b) Periodos obtenidos aplicando el software PRODISIS (MOC-2008).

Ambos mapas muestran esencialmente la misma distribución. Los periodos más bajos están en el sur de la ciudad sobre depósitos de flujo de escombros y fluviolaháricos, mientras que los más altos se presentan en la zona de depósitos de avalancha al este de la ciudad, con excepción del sitio PARE que está sobre depósitos fluviolaháricos.

La zona de avalancha volcánica tiene periodos entre 0.24 y 0.45s, y los depósitos de escombros y fluviolaháricos entre 0.14 y 0.40s.

La distribución relativa de periodos de este estudio (a partir de las funciones de transferencia), concuerda de manera general con la de Chávez et al. (2007), que muestra valores de alrededor de 0.2 en la zona norte de la ciudad y valores bajos de alrededor de 0.1 en el sur. Al este y oeste sin embargo, Chávez, et al. (2007), muestran periodos bajos, mientras que los resultados del presente estudio muestran periodos más altos para los depósitos de avalancha y fluviolaháricos.

ESPECTROS DE RESPUESTA Y ESPECTROS DE DISEÑO

Los conceptos de espectros de respuesta y de diseño son una herramienta muy importante en el área del diseño sismorresistente. El primero puede ser definido mediante una gráfica de la respuesta máxima (expresada en términos de desplazamiento, velocidad, aceleración, o cualquier otro parámetro de interés), que produce una acción dinámica determinada en una estructura considerada como un sistema un grado de libertad, mientras que el segundo es el resultado del análisis estadístico de un conjunto de espectros de respuesta y se presentan en la normativas en formas de curvas de parámetros bien definidos.

Para este estudio se usaron las componentes horizontales de registros de aceleración de dos sismos reales: el de 1995, $M_w=8.0$ y el de 2003, $M_w=7.6$ ambos registrados en la estación ubicada en la central termoeléctrica de Manzanillo (Figura 9a y 9b). Debido a que la estación en la que se registraron dichos sismos, no se encuentra sobre lecho rocoso, sino sobre un depósito arenoso, a los registros originales les fue removido el efecto de sitio mediante el proceso de deconvolución usando para ello, la función de transferencia calculada para un perfil estratigráfico similar, obtenido a unos kilómetros del sitio mencionado usando la metodología descrita en la sección anterior

(Cabrera, 2013; Figura 9c y 9d). Los registros deconvolucionados fueron utilizados como funciones de Green (Figura 9e y 9f) para propagarlos desde la base de cada uno de los perfiles estratigráficos hasta la superficie.

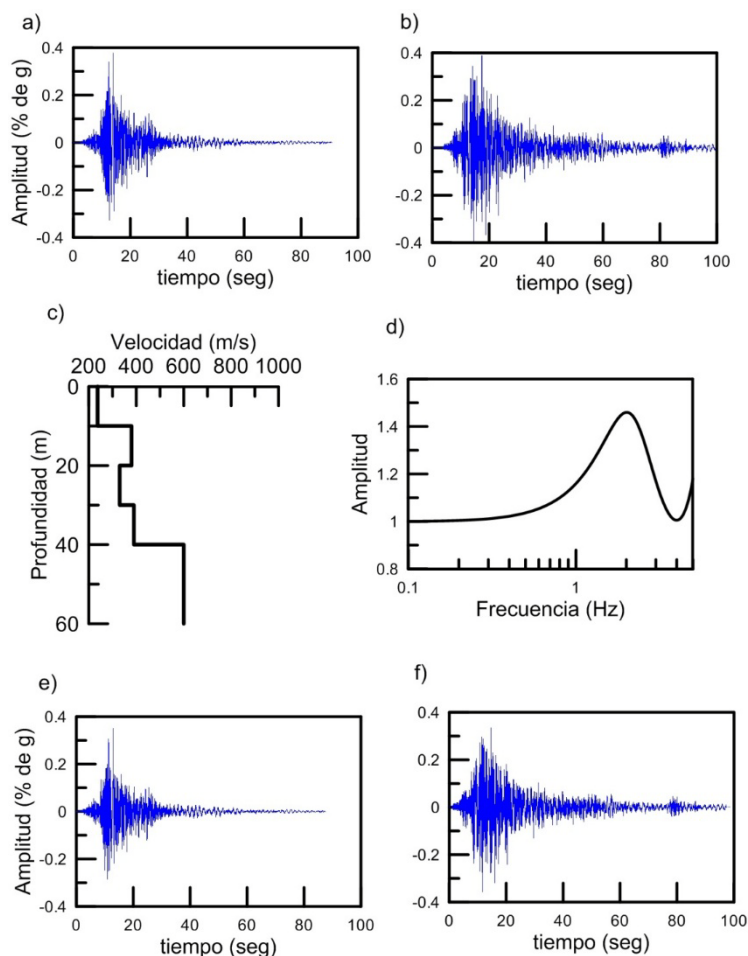


Figura 9: Registros en aceleración (componente NS) originales de los eventos de 2003 y 1995 (a y b respectivamente). En la parte media el perfil de velocidades y la función de transferencia respectiva (c y d). Registros corregidos por el medio (e y f).

Con las señales obtenidas en superficie, es decir, ya afectadas por el sitio, se obtuvieron los espectros de respuesta al 5% de amortiguamiento respecto al crítico, y se compararon con los espectros de diseño propuestos por MOC-CFE2008 para cada sitio.

La Figura 10 (a y b), muestra una comparación entre espectros de respuesta y espectros de diseño, las ordenadas están normalizados respecto a la aceleración de la gravedad (981 cm/seg^2). En estas figuras, los espectros suavizados corresponden a los propuestos por la normativa ya mencionada, mientras que los dibujados con líneas no suavizadas son los obtenidos a partir de registros sísmicos. El recuadro en la Figura 10a (ALEJ), indica el tipo de línea empleado para distinguir los diferentes tipos de espectros incluidos en el mismo gráfico.

Puede observarse que en todos los casos las amplitudes máximas de los espectros de respuesta de ambos sismos reales, son mayores que las de los espectros de diseño propuestos por MOC-CFE2008. Las amplitudes de los espectros de diseño sobre roca son cercanas o ligeramente mayores a 0.5g en la mayoría de los sitios, mientras que las ordenadas mayores de los espectros de diseño considerando las capas de suelo corresponden a los sitios PERI, phid, ALEJ, COYR, pepsi y volcanes donde dichas amplitudes son muy próximas a 1g. Para los sitios en estudio la mayor ordenada espectral en todos los casos, ocurre para el sismo de Colima de 1995 (máxima ordenada 3.3g). Tanto en el sismo de Colima de 1995 como en el de 2003, las amplitudes máximas están en un ancho de banda de entre 0.1 y 0.5 segundos aproximadamente.

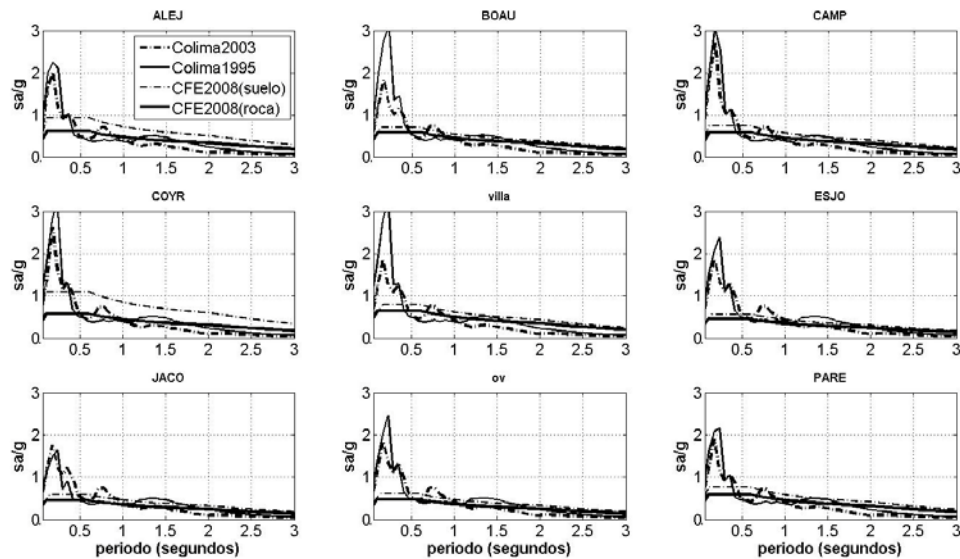


Figura 10a: Espectros de respuesta al 5% del amortiguamiento (COLIMA 1995 y 2003), y de diseño según MOC-2008 (CFE08 ROCA y SUELO), para los sitios ALEJ, BOAU, CAMP, COYR, villa, ESJO, JACO, y PARE de la ciudad de Colima.

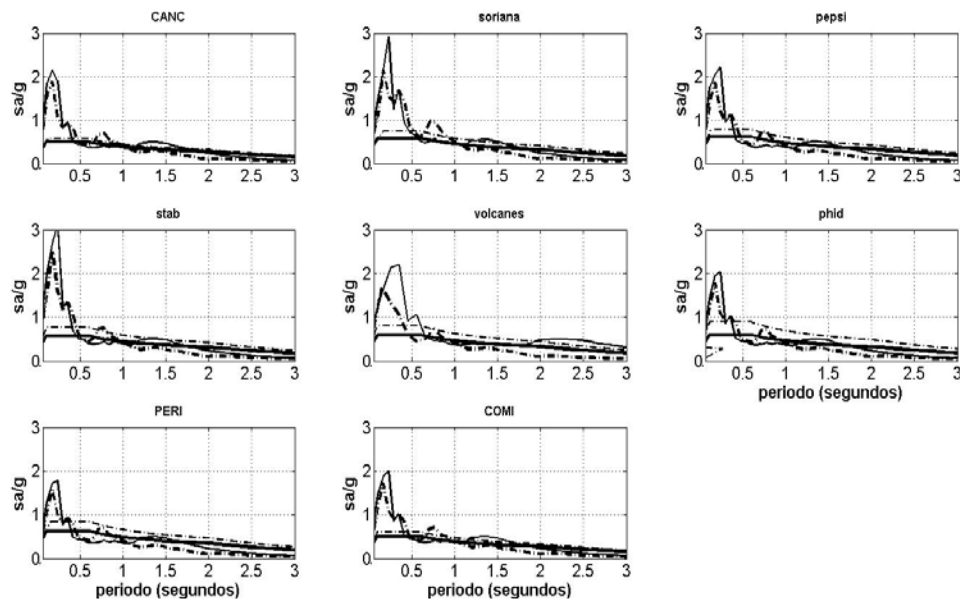


Figura 11b: Espectros de respuesta al 5% del amortiguamiento (COLIMA 1995 y 2003), y de diseño según MOC-2008 (CFE ROCA y SUELO), para los sitios: CANC, soriana, pepsi, stab, volcanes, phid y PERI, de la ciudad de Colima.

En todos los casos, la meseta del espectro de diseño va de 0.1 a 0.6 segundos alcanzando un valor máximo de coeficiente sísmico cercano a 1g; esto se presenta en dos sitios ALEJ y phid. La parte de amplitudes máximas en los espectros de respuesta de todos los sitios está dentro la meseta del espectro de diseño, por lo anterior, es evidente que el espectro de diseño con efecto de sitio según la normativa (línea a trazos con punto CFE08-suelo), puede ser considerado como el espectro envolvente para la ciudad de Colima para periodos superiores a los 0.6 segundos, no así para la zona de periodos cortos, debido a que como ya se mencionó, en esta zona espectral es donde se presentan las amplitudes máximas en los espectros de respuesta.

En función de lo anterior, es posible establecer que si se presentan nuevos sismos con características similares al de Colima de 1995 y el de Colima de 2003, las estructuras que fueron diseñadas con la norma de la CFE-2008 y que tienen un periodo de vibrar que va de 0.1 a 0.5 s, podrán verse sometidos a fuerzas sísmicas significativamente mayores que las fuerzas sísmicas que fueron consideradas para su diseño. Esto último implica también que este mismo tipo de estructuras pueden tener niveles de riesgo sísmico significativamente mayores a los que implícitamente se aceptan en las normas de la CFE.

Es importante señalar que dada la magnitud de la aceleración usada como entrada para el análisis, la respuesta obtenida enfatiza la diferencia de amplitudes debido a la inelasticidad del suelo.

Por otra parte, es conveniente destacar que para la estimación del peligro sísmico documentado mediante el software PRODISIS, se hicieron consideraciones especiales. Particularmente, para estimar peligro sísmico se usaron distribuciones log-normales truncadas a las intensidades. Las intensidades de referencia para realizar el truncado fueron las intensidades asociadas al sismo máximo determinista. Dicha situación implica que cuando se usa truncamiento se obtienen curvas de peligro sísmico con menores tasas de excedencia, que las que se obtienen cuando no hay truncamiento (MOC-CFE2008). Por ejemplo, en la tabla 2, se pueden observar valores de peligro sísmico en términos de PGA obtenidos para Colima, con procedimientos sin truncado (PSM2004) y con truncado (PRODISIS). Por lo anterior, los valores de peligro sísmico mostrados en el PRODISIS, no están asociados a un periodo de retorno constante. Esto último, está asociado a un proceso de optimización considerado en el Manual de Obras Civiles de la CFE (2008), que establece como razonable el hecho de que: “en zonas de baja sismicidad, donde el diseño para resistir carga lateral es relativamente barato, es óptimo diseñar para periodos de retorno mayores que los que se usarían en zonas de más alta sismicidad”.

Tabla 2: Valores de peligro sísmico en términos de PGA obtenidos para Colima, con procedimientos sin truncado (PSM2004) y con truncado (PRODISIS).

Fuente	Tr (años)	PGA (gales)
PRODISIS	1638	249
PSM2004	1638	435
PSM2004	475	299

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Usando la técnica de medición de ruido multicanal y mediante el método de SPAC, se estimaron las curvas de dispersión en 9 puntos de la ciudad de Colima. Los perfiles de velocidades se obtuvieron usando el procedimiento de inversión mostrado en Herrmann (1987). Dada la no unicidad de la inversión se promediaron los 3 mejores perfiles para obtener el modelo final.

Para estimar los efectos de sitio se usaron las componentes horizontales de los dos registros sísmicos deconvolucionados, para propagarlos por los 17 perfiles (9 del presente estudio y 8 de Chávez et al., 2007), para obtener las funciones de transferencia.

Al comparar los periodos de vibración del suelo inferidos aplicando la normativa MOC-CFE2008, se puede observar que existe una variación mínima con los estimados a partir de las funciones de transferencia en cada sitio. Los depósitos de avalancha volcánica tiene periodos entre 0.24 y 0.45 s, mientras que en los depósitos de escombros y fluvioaháricos entre 0.14 y 0.40 s.

Respecto a la comparación entre las ordenadas de los espectros obtenidos, resulta claro que en todos los sitios en este estudio la ordenada del espectro de respuesta, supera ampliamente a la correspondiente ordenada del espectro de diseño.

La comparación entre espectros de respuesta y de diseño no es estrictamente válida, ya que por un lado, el espectro de diseño resulta de un análisis estadístico sobre varios espectros de respuesta para un sitio cualesquiera, mientras que el espectro de respuesta es el resultado de la respuesta de varios sistemas de un grado de libertad sometidos a una misma señal sísmica. Por lo anterior para poder hacer una comparación razonable de las amplitudes entre ambos tipos de espectros aquí estudiados, se considerará la amplitud promedio de los espectros de respuesta en una banda de periodos, en este caso esta banda está entre 0 y 0.5 segundos, siguiendo el criterio señalado en 6 sitios (BOAU, CAMP, soriana y stab) la amplitud del espectro de diseño es superada en una proporción de 2 veces, en el resto de los sitios esta proporción es menor.

De lo anterior resulta evidente señalar lo que la normativa ya mencionada propone para la ciudad de Colima, la cual se localiza sobre una región de alto potencial en el aspecto del riesgo sísmico, es conservadora para la zona de periodos de moderados a altos, es decir a toda aquella estructura cuyo periodo fundamental de vibración supere los 0.6 segundos, no así a las de periodos menores como pueden ser las estructuras bajas con periodos de entre 0.1 a los 0.5 segundos.

Finalmente, a partir de las diferencias identificadas en el presente estudio entre espectros de respuesta y espectros de diseño MOC-CFE2008, se recomienda realizar estudios de riesgo sísmico, que determinen con precisión las implicaciones que dichas diferencias pueden tener en los niveles de riesgo sísmico de edificios en Colima.

REFERENCIAS

- ASCE/SEI 7-10 (2010). *Minimum Design Loads for Building and Other Structures*, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.* **25**, 415–457.
- Cabrera Mario (2013). Metodología para estimación de espesores de suelos formados por sedimentos suaves usando registros de ruido ambiental. Caso Manzanillo, Colima. Tesis de maestría. Universidad de Colima.
- Chávez-García, F. J., M. Rodríguez, and W. R. Stephenson (2005). An alternative to the SPAC analysis of microtremors: exploiting stationarity of noise, *Bull. Seism. Soc. Am.* **95**, 277–293.
- Chávez F., Domínguez T., Rodríguez M., Perez F. (2007). Site effects in a volcanic environment: A comparison between HVSR and array techniques at Colima, México. *Bull. Seis. Soc. Am.*, V97, 2, pp 591-604
- Comisión Federal de Electricidad (2008). Manual dediseño de obras civiles por Sismo. México, DF.
- Cortes, A., Garduño, V., Navarro, C., Komorowski, J., Saucedo, R., Macías, J., Gavilanes, J. (2005). Geología del Complejo Volcánico de Colima. Cartas Geológicas y mineras, No.10. Instituto de Geología, UNAM. 37p.
- EduPro. 2001. ProShake Version 1.11. User's Manual. EduPro Civil Systems, Inc. Sammamish, Washington.
- Gómez, A. (2000). Presentación de un modelo matemático para el cálculo del periodo fundamental de vibración en suelos estratificados con capacidad de predecir efectos de amplificación o atenuación dinámica, XII .Congreso Nacional de Ingeniería Estructural.
- Grajales Vargas Efraín (2003).Comportamiento dinámico de los edificios provistos con dispositivos disipadores de energía.San Nicolás de los Garza, Tesis de Maestría .UANL.
- Gutiérrez, C., K. Masaki, J. Lermo, and J. Cuenca (1996). Microzonificación sísmica de la ciudad de Colima, Cuadernos de Investigación No. 33, México.

- Herrmann, R. B. (1987). *Computer Programs in Seismology*, Saint Louis University, 7 vols.
- Haskell, N.A., (1953). The dispersion of surface waves on multilayered media, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 43, 17-34.
- IBC (2006). International Building Code, International Code Council, U.S.A.
- Kramer, 1996 Kramer, S.L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, Inc.
- Lermo, J., J. Díaz de León, E. Nava y M. Macías (1991). Estimación de periodos dominantes y amplificación relativa del suelo en la zona urbana de Colima. IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Manzanillo, Colima.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *Q. Rep. Railway Tech. Res. Inst.* **30**, no. 1, 25–33.
- Ordaz. M. (1988). Degtra V8.3.
- PRODISIS. (2008). Software Peligro Sísmico, Instituto de Investigaciones Eléctricas de CFE, Cuernavaca, Morelos.
- Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1970). “Soil Moduli and damping factors for dynamic response analyses”, *EERC* 70-10.
- Thomson W. (1950). Transmission of elastic waves through stratified solid. *Journal of applied physics*. 21. Pp. 89-93.
- Vucetic, M. and Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering (ASCE)*. Vol. 117, No. 1, pp. 89-117.