
ESTUDIO DE VIBRACION AMBIENTAL APLICANDO EL METODO SPAC EN DIFERENTES SITIOS DEL ESTADO DE COLIMA.

Ricardo Vázquez Rosas¹, Jorge Aguirre González¹, Horacio Mijares Arellano¹.

RESUMEN

El método SPAC (por su nombre en inglés (Spatial Autocorrelations Method), fue propuesto por Aki (1957), y tiene el propósito de obtener el modelo estructural del subsuelo a partir de registros simultáneos de microtemores en un arreglo de estaciones (para aplicar este método se requiere un mínimo de tres estaciones). Para el presente trabajo aplicaremos el método SPAC a los datos de microtemores para obtener la curva de dispersión de ondas Rayleigh para estimar un modelo de velocidades, para cada arreglo y poder así, con la información de todos los arreglos, integrarlos para obtener un modelo tridimensional del subsuelo.

ABSTRACT

The SPAC method (Spatial autocorrelation method) was proposed by Aki (1957), and has the goal of obtaining the subsoil velocity structure from a microtremor array of stations (to apply this method a minimum of three stations are required). For this work we applied the SPAC method to the recorded microtremor data in order to obtain the dispersion curves of Rayleigh waves to estimate the velocity model for each array. Then, with the information of all the arrays integrate them to obtaining a tridimensional sub-soil model.

INTRODUCCIÓN

El estado de Colima colinda al norte con Jalisco; al este con Jalisco y Michoacán de Ocampo; al sur con Michoacán de Ocampo y el Océano Pacífico; al oeste con el Océano Pacífico y Jalisco. El estado representa el 0.3% de superficie con respecto al país, y sus coordenadas geográficas son las siguientes al norte 19°31', al sur 18°41' de latitud norte; al este 103°29', al oeste 104°41' de longitud oeste.

El estado de Colima, por su localización, está sujeto a la ocurrencia de sismos destructivos, como ha sido demostrado en el pasado. Si bien, la tasa de sismicidad es menor a la observada en el estado de Guerrero, por ejemplo, no es despreciable. A pesar de ello, tanto la cultura de prevención, como estudios detallados de los sismos y sus efectos no existen en cantidad suficiente en el estado de Colima. Por lo cual es importante el realizar este tipo de estudios para tener un mejor conocimiento del efecto de sitio ante la ocurrencia de eventos sísmicos.

Por otro lado el estado de Colima tiene fuentes generadoras de sismo como son las fuentes volcánicas, las tectónicas, las Locales y las generadas por inducción.

CONTEXTO GEODINAMICO DEL ESTADO DE COLIMA.

1 Coordinación de Ingeniería Sismológica, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. Apdo. postal 70-472, Coyoacán, 04510 México D.F. Telefono (55) 56233500 ext. 1266 y 1262 rvazquezr@iingen.unam.mx, joagg@pumas.iingen.unam.mx, hma@pumas.iingen.unam.mx.

El estado de Colima está ubicado en una región estructuralmente compleja (Fig. 1), donde el bloque de Jalisco se separó de la parte continental de México desde el Plioceno y formó grabenes a lo largo de sus fronteras; el graben de Colima, localizado en el norte, es uno de ellos (Rosas-Elguera *et al.*, 1996; Garduño-Monroy *et al.*, 1998). Existe un sistema de fallas al sur del Volcán de Colima, entre el bloque de Jalisco en la parte noroeste, y los bloques de Tuxpan y Tumbiscatío en el este y sureste, respectivamente (Rosas-Elguera *et al.*, 1996; Garduño-Monroy *et al.*, 1998). Este sistema de fallas está limitado por la Falla Tamazula (TF) del lado del Bloque de Jalisco y por la Falla 1 (F1) del Bloque de Tumbiscatío (Fig. 1). La discusión sobre la naturaleza de ese sistema está abierta (Garduño-Monroy *et al.*, 1998; Bandy *et al.*, 1995), por lo que en este trabajo nombramos al sistema, simplemente como el Sistema de Fallas del Sur de Colima (SFSC).

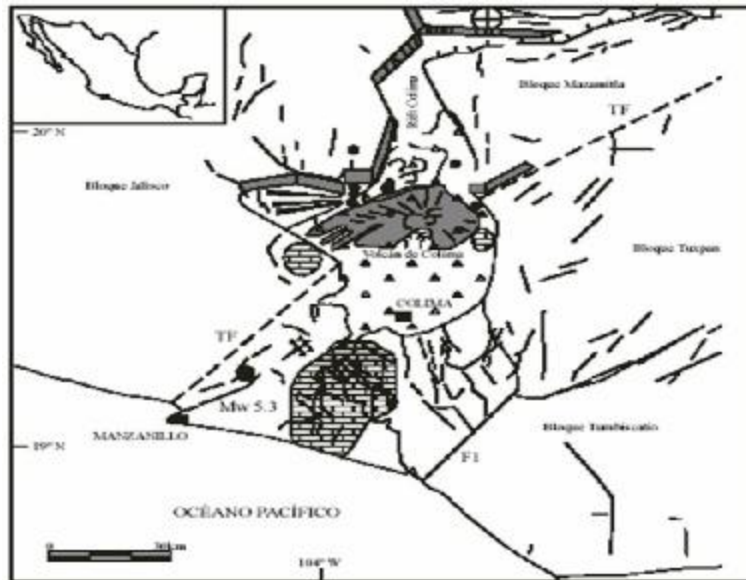


Figura 1. Mapa estructural de la zona del complejo volcánico de Colima (modificado de Garduño-Monroy *et al.*, 1998). Las líneas muestran fallas tectónicas; la zona de avalanchas del Volcán de Colima se muestra con triángulos; los afloramientos de caliza se muestran con pantalla de ladrillos; el epicentro del temblor del 6 de marzo del 2000 se muestra con el círculo negro. TF es la Falla Tamazula, F1 es la Falla 1. Los círculos con cruz representan volcanes monogénicos.

En el estado de Colima hay afloramientos de los diferentes tipos fundamentales de rocas (ígneas, sedimentarias y metamórficas). Las metamórficas son las más escasas y las más antiguas, pues se les asigna una edad correspondiente al Jurásico. Las ígneas tanto intrusivas como extrusivas son las más abundantes, abarcan un amplio periodo que va desde fines del Cretácico hasta el Terciario Superior. Forman estructuras volcánicas sobresalientes en el paisaje nacional, como el Volcán de Colima. Las sedimentarias marinas del Cretácico también están ampliamente distribuidas por el territorio de la entidad, y forman estructuras plegadas, discontinuas, debidas a las rupturas producidas en la corteza terrestre por la actividad volcánica tectónica (ver figura 2).



Figura2. Geología superficial del estado de Colima (INEGI)

el estado de Colima por su ubicación geográfica se encuentra dentro de las zonas de alta sismicidad dentro del país, La Figura 3 muestra la distribución de los epicentros de los sismos corticales (la profundidad de 0 a 35 km) con magnitud $M_c=4.0$ registrados por la red sísmológica regional RESCO entre 1989 y el 2000. Se puede ver que los epicentros forman una estructura lineal en la parte oeste del SFSC, paralela a la Falla Tamazula, lo que sugiere una relación con las fallas locales. Por otro lado como se puede constatar Colima es un estado relativamente pequeño y este a sufrido graves daños a consecuencia de sismos como el del enero del 2003.

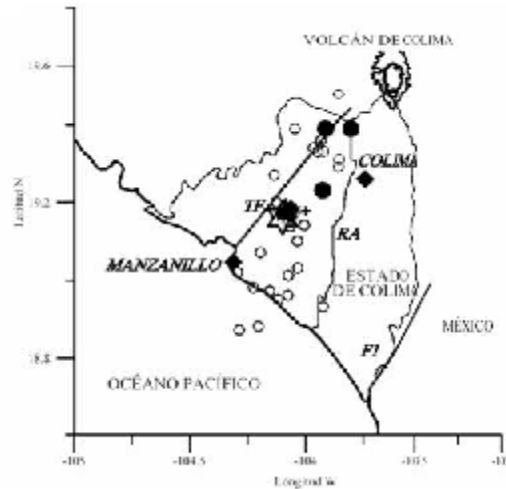


Figura 3. Epicentros de sismos corticales con magnitud mayor que 4.0 (profundidad 0-35 km) registrados en el estado de Colima por la red RESCO entre 1988 y 2000.

El estado de Colima a través de la historia, ha sido testigo de infinidad de movimientos telúricos, de intensidades mayores a VI que han provocado en algunos casos hasta pérdidas humanas y daños materiales en el estado de Colima. Como podemos observar en el mapa de Isosistas acumulados para 72 eventos de 1845 – 1999 haciendo referencia a los sentidos en el estado de Colima. El estado a sentido eventos de intensidad considerable dentro de la escala de Mercalli Modificada como podemos observar en el siguiente mapa (ver figura 4).

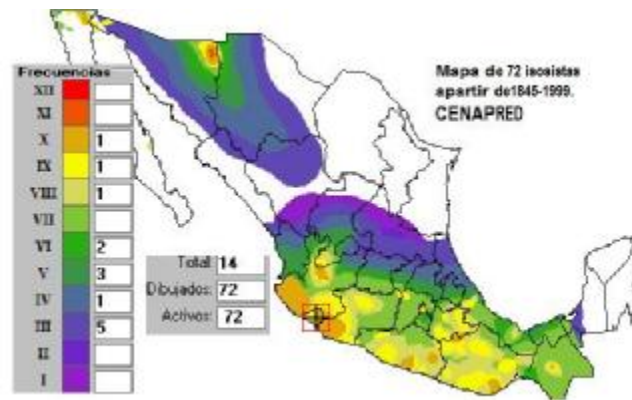


Figura 4. Mapa de Isosistas acumulado para el estado de Colima Michoacán (CENAPRED 2000).

METODO SPAC.

El método SPAC tiene el propósito de obtener el modelo estructural a partir de registros de microtemores. Para ello se requiere registrar microtemores simultáneamente en varias estaciones que conforman un arreglo instrumental. Con esa información y mediante el procesado que describiremos a continuación se obtiene la curva de dispersión de ondas Rayleigh, que posteriormente se usa para determinar la estructura de velocidades buscada.

Siguiendo la metodología descrita por Aki (1957), consideremos un arreglo de estaciones dispuestas en un arreglo circular para la observación de microtemores. Representamos ondas armónicas de frecuencia circular ω de microtemores por $u(0,0,\omega,t)$ y $u(r,\mathbf{q},\omega,t)$, las cuales son observadas en el centro $C(0,0)$ del arreglo y en el punto $X(r,\mathbf{q})$ sobre el círculo de radio r . Entonces la función de autocorrelación espacial se define como:

$$f(r,\mathbf{q},\omega) = \overline{u(0,0,\omega,t) \cdot u(r,\mathbf{q},\omega,t)}, \quad (1)$$

Donde $\overline{u(t)}$ significa el valor promedio en el dominio del tiempo. El coeficiente de autocorrelación espacial se define como el promedio de la función de autocorrelación espacial se define como el promedio de la función de autocorrelación (SPAC) en todos los sitios de observación que se encuentran en el arreglo circular, esto es:

$$r(r,\omega) = \frac{1}{2p \cdot f(0,\omega)} \int_0^{2p} f(r,\mathbf{q},\omega) \cdot d\mathbf{q}, \quad (2)$$

Donde $f(0,\omega)$ es la función SPAC en el centro $C(0,0)$. La integral de la ecuación (2) se reduce a:

$$r(\omega;r) = J_0 \left(\frac{\omega r}{c(\omega)} \right), \quad (3)$$

Donde $J_0(\cdot)$ es la función de Bessel de primer especie y de orden cero, $c(\omega)$ es la velocidad de fase en la frecuencia ω . El coeficiente SPAC de la ecuación (2) puede ser calculado directamente en el dominio de la frecuencia usando la transformada de Fourier de los microtemores observados de la siguiente forma:

$$r(r, \omega) = \frac{1}{2p} \int_0^{2p} \frac{\text{Re}[S_{CX}(\omega; r, q)]}{\sqrt{S_C(\omega) \cdot S_X(\omega; r, q)}} dq, \quad (4)$$

Donde $\text{Re}[\cdot]$ significa la parte real de un valor complejo, $S_C(\omega)$ y $S_X(\omega; r, q)$ son los espectros de potencia de los microtemores en los dos sitios C y X respectivamente, y $S_{CX}(\omega; r, q)$ es el espectro cruzado (cross spectrum) entre los dos sitios. Esta ecuación significa que los coeficientes SPAC son obtenidos por medio del promedio de una función de coherencia normalizada definida como co-espectro (co-spectrum) entre dos sitios con respecto a la dirección q .

La ecuación (4) puede ser obtenida directamente a partir de los microtemores observados usando técnicas como el método FFT. La velocidad de fase puede ser calculada para frecuencia ω a partir del argumento de la función Bessel de la ecuación (3).

Los sitios donde se realizaron las mediciones fueron en el fraccionamiento Santa Bárbara, Cerro de Ortega, Tecoman, Manzanillo y por ultimo en la ciudad de Colima.

Aplicación del Método SPAC. (En este orden se describe posterior mente mostrando solo los resultados.)

El preprocesado se realiza en el siguiente orden:

- Se convierten los registros de .EVT a ASCII.
- truncaron los registros para tener el mismo tiempo de referencia en todas las estaciones ya que lo que se pretende es obtener es una buena correlación entre las señales de las distintas estaciones.
- La correlación de unidades, el suavizado y la obtención de los coeficientes de correlación, se realizan en un programa en fortran.
- Se leen los archivos truncados con un encabezado.
- Se leen ventanas de tiempo seleccionadas de (81.92 seg).
- Se obtienen los espectros de potencia para cada ventana y cada estación.
- Se calculan los coeficientes de correlación.

APLICACIÓN DEL MÉTODO SPAC.

Por razones practicas mostraremos un ejemplo completo de cómo se aplico el método SPAC, con lo cual iniciaremos con el arreglo realizado en el fraccionamiento de Santa Bárbara (arreglo de 60m). En cada arreglo se registro media hora de grabación en cada uno de los arreglos instrumentales para este caso fueron de 5m., 15m., 30m y 60m. Como se muestra en la figura 5.

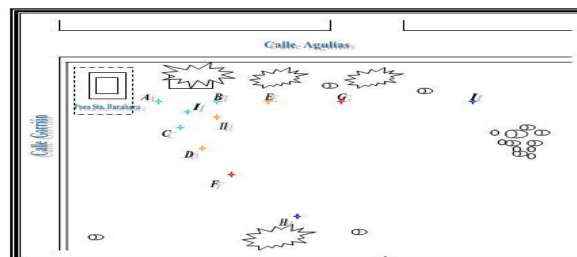


Figura 5. Muestra gráficamente los arreglos triangulares realizados en la colonia Santa Bárbara.

Los instrumentos que se utilizaron en estas mediciones fueron registradores K2 con sensores verticales de velocidad de 5s kinemetrics. La duración de grabación fue de 1800s (ver figura 5) para cada arreglo realizado en cada uno de los sitios.

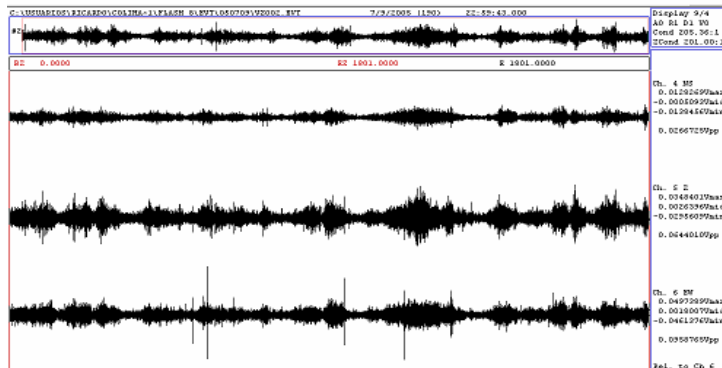


Figura 5. Grafica de los registros de microtremores las unidades en el eje horizontal están en segundos y en el eje vertical están en volts.

Para cada ventana se obtienen los espectros de potencia para cada uno de los vértices. Posteriormente se obtienen las correlaciones normalizadas para las 21 ventanas, correspondientes a la parte interna de la integral de la ecuación (4).

Un ejemplo de estas correlaciones se muestra en la figura 6. En cada grafica se observan tres curvas que corresponden a cada par de estaciones usado. Se puede observar que en la mayoría de las graficas las tres curvas muestran un comportamiento semejante. Además su comportamiento es bastante parecido al de una función Bessel de orden cero. Por lo que los criterios que usamos para seleccionar las ventanas de tiempo consideraron que buscamos el parecido con una función Bessel de orden cero. Por ello se buscó que las curvas en frecuencias bajas estuvieran con valores cercanos a uno. Se buscó además que las tres curvas en la misma grafica tuvieran el mismo comportamiento y que el comportamiento fuera similar entre diferentes ventanas de tiempo.

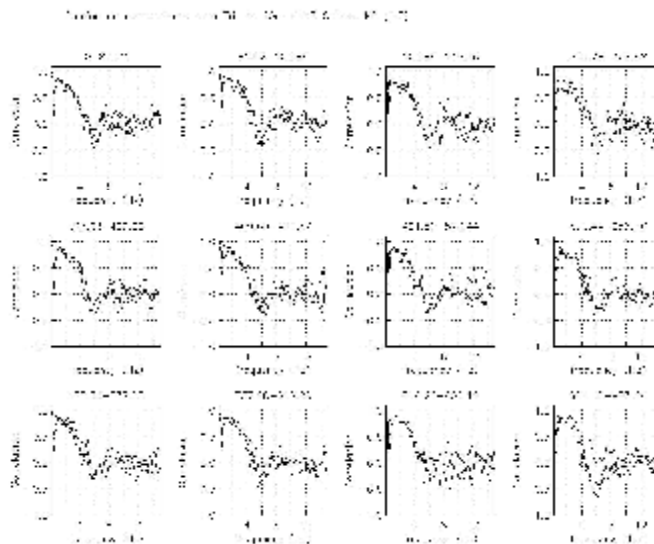


Figura 6. Ejemplo de correlaciones calculadas entre las tres estaciones para las primeras 12 de las 21 ventanas de 81.92 segundos calculadas en total.

En este último punto, fue importante buscar que el cruce por cero de las funciones fuera congruente entre las diferentes ventanas de tiempo. Una vez seleccionadas las ventanas se calcula el coeficiente de correlación de las tres estaciones, a través de un ensamble de las tres correlaciones para aquellas ventanas de tiempo. Un ejemplo de coeficiente de auto-correlación se muestra en la figura 7.

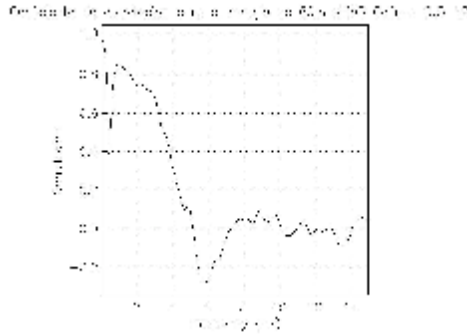


Figura 6. Ejemplo del coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo de 60m.

Una vez seleccionados las mejores correlaciones se calcula la curva de dispersión para cada uno de los triángulos como se muestra en la figura 7. En esta figura solo se grafican las secciones de curvas comprendidas entre líneas rectas que delimitan el llamado abanico de confiabilidad según lo definió Miyakoshi (1995) y que además muestren una tendencia decreciente esperada para una curva de dispersión de velocidad de fase. Otra información que permite el trazado de la curva de dispersión proviene del cruce por cero del coeficiente de autocorrelación. La frecuencia en la que la función de autocorrelación tiene su primer cero, permite definir con buena precisión la velocidad de fase para esa frecuencia tomando en cuenta la distancia entre receptores.

En la misma gráfica de la figura 7, aparece la curva de dispersión calculada con la estratigrafía mostrada en la tabla de la parte superior derecha de la misma figura o bien representada en la figura 8. El modelo estratigráfico fue obtenido por ensayo y error, a partir del modelo inicial propuesto. Mostrando para los arreglos de 5m, 15m, 30 y 60m en Santa Bárbara. En la figura 7 están indicados los cruces por cero obtenidos de los diferentes tamaños de arreglos que son de mucha ayuda en la definición de la curva de dispersión. La misma metodología fue empleada para analizar los otros sitios. No siempre es posible encontrar tramos de curvas de dispersión que cubrieran todo el abanico de confiabilidad, pero con los tramos encontrados mas los puntos proporcionados por los cruces por cero permitieron encontrar los modelos estratigráficos reportados.

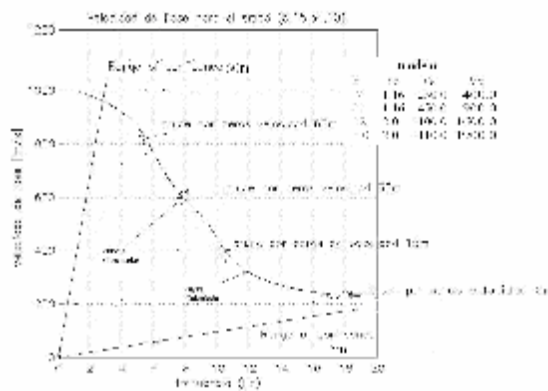


Figura 7. Curva de dispersión observada para el sitio Colima Santa Bárbara, para los cuatro arreglos triangulares con línea punteada (5,15, 30, 60 m) y con línea continua la curva calculada, mostrando en la parte superior derecha el modelo calculado.

Una vez obtenido el resultado de la curva de dispersión para el sitio de Santa Bárbara se grafica la estructura de velocidades como se muestra en la figura 8.

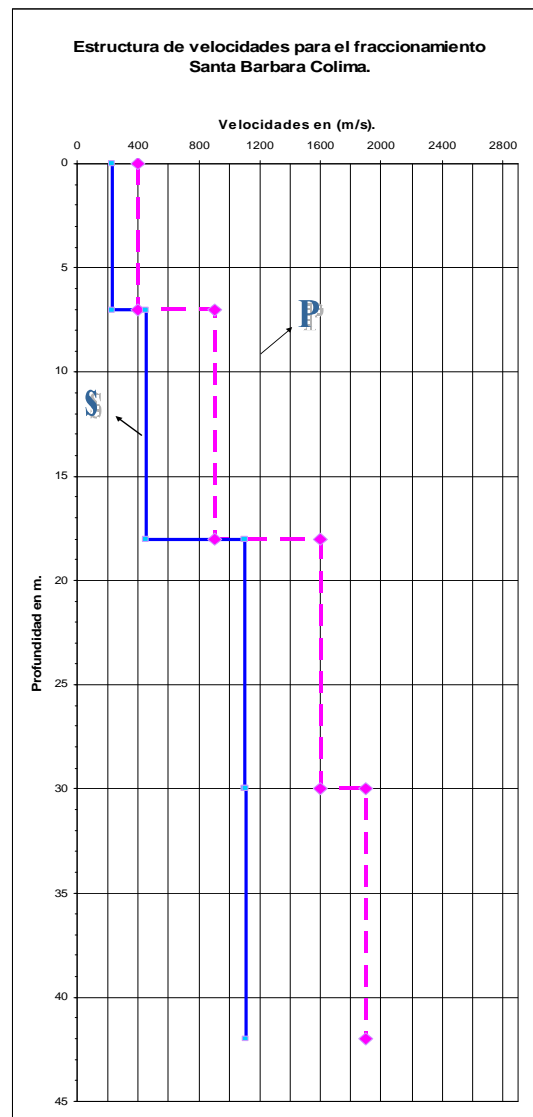


Figura 9. Perfil de velocidades para el sitio Colima Santa Bárbara, determinado a partir de los datos de los arreglos triangulares. Se muestran con línea continua la velocidad de ondas S y con línea punteada la velocidad de ondas P. Modelo utilizado para calcular la curva de dispersión en las gráficas de la figura 7.

CERRO DE ORTEGA. COLIMA

Esta localidad se localiza al sur del estado de Colima. En este sitio se hicieron dentro de una escuela preparatoria de Colima, trazando arreglos con aberturas de 5, 15,30 y 60 metros.

En este sitio se obtuvo resultados en las aberturas de 15m teniendo correlaciones en 4 ventanas y dando como resultado en el coeficiente de correlación el cruce por cero alrededor de 11 Hz. para el arreglo de 60m se obtuvo correlaciones en 6 ventanas de 81.92 s, dando como resultado el coeficiente de correlación el cruce

por cero alrededor de 4Hz. obtenidos estos resultado se calculo la curva de dispersión para estos dos arreglos como se muestra en la figura 10.

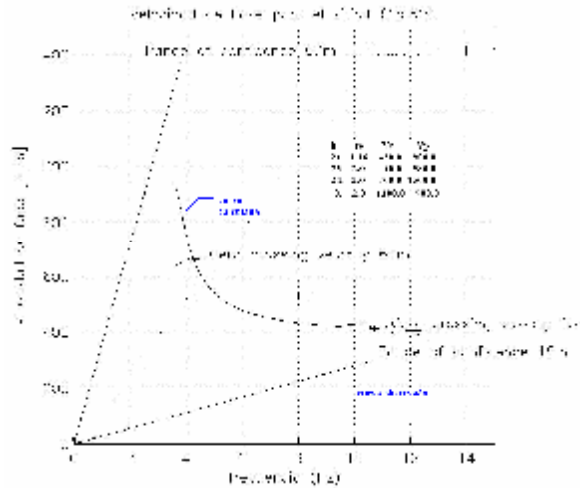


Figura 10. Curva de dispersión observada para el sitio Cerro de Ortega, para los cuatro arreglos triangulares con línea punteada (5,15, 30, 60 m) y con línea continua la curva calculada.

TECOMAN.

Para este sitio se obtuvo la curva de dispersión para tres aberturas una de 15m, 30m y 60m con las que se obtuvo la curva de dispersión con la que se obtuvo el modelo de velocidades. Para el arreglo de 15m en este arreglo se seleccionaron 8 ventanas de 81.92s y se obtuvo el promediado de los coeficientes de correlación (Ver figura 11). Para el arreglo de 30m en este arreglo se seleccionaron 11 ventanas y por ultimo para el de 60m se seleccionaron 5 ventanas considerando el cruce por cero y que tuvieran una mejor similitud entre ellas calculada la curva de dispersión para cada arreglo se obtuvo un modelo equivalente con el que se calculo la curva de dispersión (como se ilustra en la parte superior derecha de figura 11) para los tres arreglos (Ver figura 11).

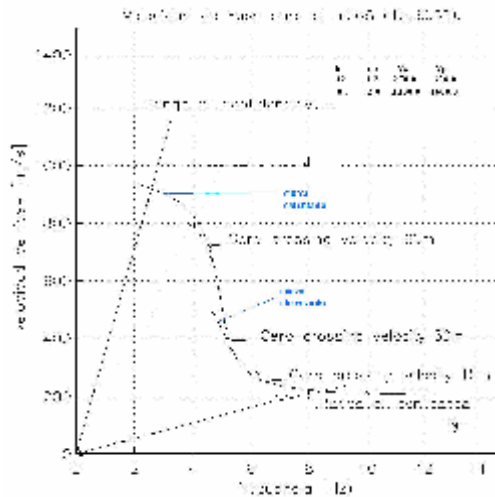


Figura 11. Curvas de dispersión observadas para los tres arreglos indicando los cruces por cero (línea punteada), la curva calculada (línea continua) y sus abanicos de confiabilidad.

MANZANILLO.

Para este sitio se obtuvo la curva de dispersión para tres aberturas una de 15m, 30m y 50m, de los resultados obtenidos en las curvas individuales de cada arreglo se obtuvo un modelo equivalente para obtener una sola curva de dispersión para todos los arreglos. El modelo calculado se muestra dentro de la figura 12 en a parte superior derecha, este fue calculado para dos capas mas el semi-espacio.

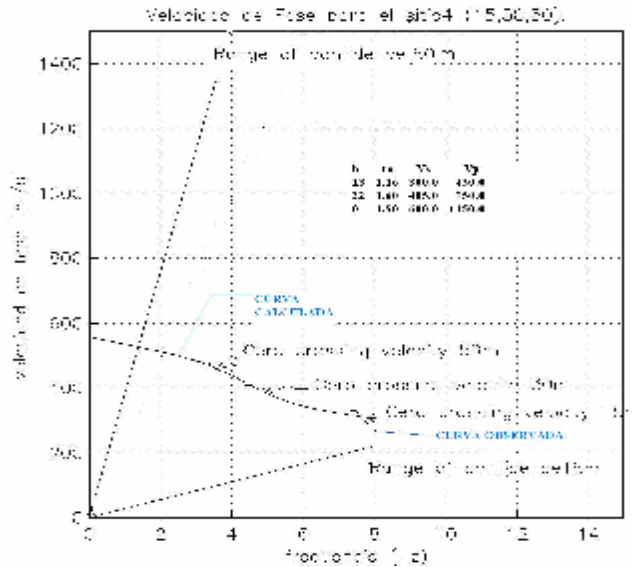


Figura 12. Curvas de dispersión observadas para los tres arreglos indicando los cruces por cero (línea punteada), la curva calculada (línea continua) y sus abanicos de confiabilidad, mostrando el modelo de análisis.

COLIMA.

Estos arreglos se realizaron dentro de la universidad de colima localizado en Villa de Álvarez. Para este sitio se obtuvo la curva de dispersión para tres aberturas una de 15 m, 30 m y 50 m con las que se obtuvo la curva de dispersión con las que se obtuvo el modelo de velocidades. Para el arreglo de 50 m se seleccionaron 15 ventanas de 81.92 segundos, 12 para el arreglo de 30 m, y 11 para el arreglo de 15 m. Con los coeficientes de autocorrelación anteriores se calculó la curva de dispersión considerando también los cruces por cero. en la grafica 13 se ilustra la curva de dispersión obtenida para este sitio.

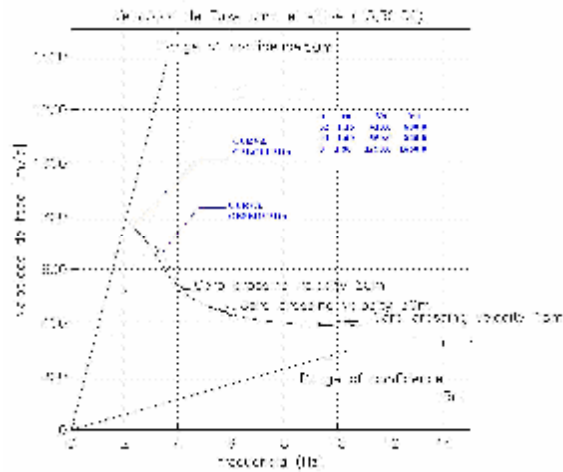


Figura 13 Curvas de dispersión observadas para los tres arreglos indicando los cruces por cero (línea punteada), la curva calculada (línea continua) y sus abanicos de confiabilidad, mostrando el modelo de análisis.

CONCLUSIONES

Se realizaron mediciones de microtremores en 16 arreglos triangulares que variaron entre 5m y 60 m en 5 sitios del estado de Colima. Con estos datos se logró obtener información de las velocidades de los estratos más superficiales. A pesar de contar con aberturas de hasta 60 m. Para el sitio del fraccionamiento de Santa Bárbara, se logró obtener información de las velocidades de los estratos más superficiales de aproximadamente 30m de exploración, mientras que para el arreglo de Cerro de ortega se obtuvo una profundidad de de exploración aproximada de 68m, para el arreglo en Tecoman se obtuvo una profundidad de exploración de alrededor de 12 m, para el arreglo de Manzanillo se estimó una profundidad de exploración alrededor de 35m, mientras que para el arreglo de Colima se obtuvo una profundidad de exploración máxima alrededor de 73m.

En general, las velocidades de los estratos superficiales fluctúan entre 230 m/s y 420 m/s para la capa más superficial. Lo que muestra que los sedimentos en las capas más superficiales son bastante competentes. El estrato superficial con menor velocidad se observó en los arreglos de Tecoman, mientras que el de mayor velocidad se observó en los arreglos del Cerro de Ortega.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue financiado por CONACYT, con el proyecto SEP- 2003-C02-43880/A.

REFERENCIAS

Aki, K. (1957), **“Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremores”**, Bull. Earthq. Res. Inst., 35, 415-456.

Aguirre González Jorge, Mijares Arellano Horacio,(2003) **“ aplicación del método SPAC para estudios geotécnicos caso Texcoco”**.SMIS art. III-04

Bard, P., 1998. **“Microtremor Measurements: A tool for site effect estimation. The effects of Surface Geology on Seismic Motion”**, Irikura, Kudo, Okada & Sasatani (eds), 1251-1279.

Nakamura, Y., (1989), **“A method for dynamic characterics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface”**. QR of R.T.R., 30-1

Ricardo Vázquez Rosas, Jorge Aguirre González (2003), **“Propuesta de Microzonificación sísmica para la ciudad de Uruapan Mich”**. SMIS art. II-08.

Ricardo Vázquez Rosas, Jorge Aguirre González (2005), **“Propuesta de Microzonificación sísmica para la ciudad de Zamora Mich”**. SMIS art. III-02.

Ricardo Vázquez Rosas, Jorge Aguirre González (2005), **“Estudio de microtremores para la ciudad de Uruapan Mich. Aplicando el método SPAC”**. SMIS art. IV-05.

Yamamoto, H., 1998 **“An experiment for estimating S-wave velocity structure from phase velocities of Love and Rayleigh waves in microtremors”**. The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Irikura, Kudo, Okada and Sasatani (eds.), Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp 705-710.

Bandy, W.L., Mortera-Gutiérrez, C.A., Urrutia-Fucugauchi, J., 1995. **“The subducted Rivera-Cocos plate boundary – where is it, what is it and what is its relationship to the Colima rift”** Geophysical Research Letters., 22, 3075-3078.

Garduño-Monroy, V.H., Saucedo-Girón, R., Jiménez, Z., 1998. **“La falla Tamazula, límite suroriental del bloque de Jalisco y sus relaciones con el complejo volcánico de Colima”**. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 15: 132-144.

Rosas-Elguera, J., Ferrari, L., Garduño-Monroy, V.H., 1996. **“Continental boundaries of the Jalisco block and their influence in the Pliocene-Quaternary kinematics of western México”**. Geology, 24, 921-924.

Zobin, V., Reyes-Dávila, G. A., Pérez-Santa, Ana, L. M., Ramírez-Vázquez, C. A., y Ventura-Ramírez, J. F., 2000 **“Estudio macrosísmico del temblor de colima (Mw 5.3) del 6 de marzo del 2000”**, GEOS, Vol. 20, No. 4, p. 414-417

Página en línea del INEGI 2007. <http://www.inegi.gob.mx/inegi/default.aspx>

CENAPRED programa de isosistas acumulado .DPS 2000.

