

Sísmica de dispersión de ondas superficiales usando ruido sísmico. Siete mediciones en el Estado de Colima, México.

Seismic of dispersion of surface waves using seismic noise. Seven measurements at the Colima state, Mexico.

Jorge Aguirre González, Instituto de Ingeniería, UNAM, D.F., joagg@pumas.iingen.unam.mx

Miguel Rodríguez González, Instituto de Ingeniería, UNAM, D.F., mrod@pumas.iingen.unam

Ricardo Vázquez Rosas, Instituto de Ingeniería, UNAM, D.F., rvazquezr@iingen.unam.mx

RESUMEN: La estructura somera de la velocidad de cortante es un elemento básico en los estudios de la amplificación del terreno y de la respuesta de sitio de cuencas sedimentarias. El método SPAC permite estimar la estructura de velocidad de cortante mediante el uso de ruido ambiente como señal, por lo que es claramente apropiado en zonas urbanas, presentando ventajas notables con respecto a los métodos tradicionales de prospección (refracción/reflexión) y pozos geotécnicos. Sin embargo, el despliegue instrumental ha sido una de sus principales limitaciones. Recientemente, se ha propuesto que SPAC puede usarse sin restricciones en la geometría del arreglo (Chávez-García et al, 2005), por lo que presenta una alternativa razonable. En siete sitios del estado de Colima, hicimos SPAC, usando sismógrafos de banda ancha distribuidos en varios arreglos triangulares y también usando SPAC pero con un arreglo lineal y un equipo tradicional de prospección con doce canales y sensores de 4.5 Hz. Los resultados obtenidos de la inversión de las curvas de dispersión obtenidos con los dos tipos de arreglos fueron consistentes indicando velocidades de onda S de los estratos más superficiales entre 200 y 500 m/s en los siete arreglos. También concuerdan de manera excelente con mediciones en pozo con sonda suspendida existentes en dos de los sitios estudiados.

ABSTRACT: The surficial shear velocity structure is a basic element in the ground amplification studies and sedimentary basin site response. The SPAC method allow to estimate the shear velocity structure by mean of ambient noise as signal, it make it appropriate for urban zones, giving some advantages in comparison with traditional prospecting methods (refraction/refraction) and geotechnical boreholes. However, the instrumental deployment has been one of its principal limitations. Recently, it has been proposed that it can be used without restrictions in the array geometry (Chávez-García et al, 2005), which presents a reasonable alternative. We applied SPAC in 7 sites of Colima state, using broad band seismometers distributed in several triangular arrays and also 12 sensors linear array using a traditional prospecting equipment with 4.5 Hz sensors. The results obtained in both cases are consistent. The S waves of the surficial layers are ranging from 200 to 500 m/s. Also agree with borehole data logging existent in two sites.

1 INTRODUCCION.

La estructura somera de la velocidad de cortante es un elemento básico en los estudios de la amplificación del terreno y de la respuesta de sitio de cuencas sedimentarias. Es un parámetro útil en las normas actuales de construcción y el valor V30 es de uso en el diseño por sismo. En el futuro, sin duda, será integrado en los mapas de riesgo particularmente en zonas urbanas. Los métodos tradicionales de prospección (refracción/reflexión) de velocidad de cortante tienen fuertes limitaciones cuando se trata de actuar en zonas urbanas o en sitios en que se prefiere métodos no destructivos. Los pozos geotécnicos son caros, por lo que se ha generado gran interés en alternativas de prospección que puedan operar en sitios con niveles de ruido sísmico alto, rápidas, y baratas. El método SPAC utiliza el ruido ambiente como señal, por lo que es claramente apropiado en zonas urbanas, sin embargo, el despliegue instrumental ha sido una de sus principales limitaciones.

El método conocido como SPAC (Spatial autocorrelation method) fue introducido por primera vez por Aki en 1957. En este se plantea que a partir de la medición de microtemores simultáneamente en varias estaciones es posible obtener la curva de dispersión por medio del cálculo del coeficiente de autocorrelación espacial. A pesar de las ventajas que brinda este método permaneció casi sin usarse durante varios años. Fue hasta la década de los 90's cuando fue retomada por varios investigadores japoneses entre ellos Okada and Matsushima (1989), Miyakoshi et al. (1998), Yamamoto (1998).

Estos investigadores han propuesto diversas geometrías para la realización de sus arreglos. La mayoría de estos trabajos han trabajado con ondas Rayleigh, mientras que las ondas de Love han sido menos exploradas. Recientemente, se ha propuesto que SPAC puede usarse sin restricciones en la geometría del arreglo (Chávez-García et al, 2005), por lo que presenta una alternativa razonable. En este trabajo mostramos los resultados de exploraciones realizadas usando SPAC, en varios sitios del estado de Colima con el fin de conocer la estratigrafía superficial. Se midieron microtemores en 2 tipos de arreglos: 1) unos de ellos formado triángulos equiláteros combinando

sensores verticales de velocidad de 5 y de banda ancha de 30 Hz (Guralp 40GTm+Reftek) y 2) los otros en línea con sensores verticales de 4.5 Hz. y un equipo tradicional de prospección con doce canales. Los resultados obtenidos de la inversión de las curvas de dispersión obtenidos con los dos tipos de arreglos fueron consistentes. En ambos casos los resultados indican que las velocidades de cortante de los estratos más superficiales oscilan entre 200 y 500 m/s en los siete arreglos. En dos de los sitios estudiados hay mediciones en pozo con sonda suspendida y los resultados obtenidos en este trabajo concuerdan de manera excelente.

2 MÉTODOS DE ANÁLISIS

En los siguientes párrafos describiremos brevemente los métodos utilizados en este trabajo. Estos son el método SPAC en arreglos triangulares (tradicional) y el arreglo SPAC en línea.

2.1 Método SPAC en arreglos triangulares (tradicional)

El método SPAC tiene el propósito de obtener el modelo estructural a partir de registros de microtremores. Para ello se requiere registrar microtremores simultáneamente en varias estaciones que conforman un arreglo instrumental. Con esa información y mediante el procesamiento 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 microtremores. Representamos ondas armónicas de frecuencia circular ω de microtremores por $u(0,0,\omega,t)$ y $u(r,\theta,\omega,t)$, las cuales son observadas en el centro $C(0,0)$ del arreglo y en el punto $X(r,\theta)$ sobre el círculo de radio r . Entonces la función de autocorrelación espacial se define como:

$$\phi(r,\theta,\omega) = \overline{u(0,0,\omega,t) \cdot u(r,\theta,\omega,t)}, \quad (1)$$

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:

$$\rho(r,\omega) = \frac{1}{2\pi \cdot \phi(0,\omega)} \int_0^{2\pi} \phi(r,\theta,\omega) \cdot d\theta, \quad (2)$$

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

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

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 microtremores observados de la siguiente forma:

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

Donde $\text{Re}[\cdot]$ significa la parte real de un valor complejo, $S_C(\omega)$ y $S_X(\omega;r,\theta)$ son los espectros de potencia de los microtremores en los dos sitios C y X respectivamente, y $S_{CX}(\omega;r,\theta)$ 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 θ .

La ecuación (4) puede ser obtenida directamente a partir de los microtremores 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).

2.2 Método SPAC en línea

Chávez-García *et al.* (2005) presentaron una extensión del método SPAC, donde las curvas de dispersión de velocidad de fase fueron obtenidas desde los registros de datos de un arreglo sísmico temporal con una geometría muy irregular. La diferencia básica con respecto al método propuesto por Aki (1957) fue el sustituir el promediado azimutal requerido por el método por el promediado temporal. Los buenos resultados obtenidos en ese trabajo condujeron a los autores a proponer arreglos de estaciones tan diferentes como fuera posible de un círculo, una línea de estaciones (Chávez-García *et al.* 2006). Los resultados nuevamente fueron muy buenos, con lo que se consiguió liberar al método SPAC de las restricciones geométricas en la forma del arreglo usado a que estaba sujeto.

3 DESCRIPCIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO

Los lugares en donde se realizaron los arreglos son en total siete. Cuatro de ellos ubicados en la ciudad de Colima: en CU, Cercano a la estación de ferrocarril, Santa Bárbara y Villa de Álvarez. Los tres restantes se

encuentran en Tecomán, Cerro de Ortega y el Naranjo (este último cerca de Manzanillo).

El interés de conocer la estructura de velocidades de estos sitios es debido a que en cuatro de ellos se instalaron estaciones acelerograficas. En los dos restantes (Colima CU y Colima Santa Bárbara) el propósito es cotejar los resultados obtenidos con estos métodos con la estructura de velocidades obtenida a partir de mediciones de sonda suspendida realizada en pozos ubicados en estos dos sitios. Por falta de espacio, en este trabajo únicamente mostraremos resultados de tres de estos siete sitios. A continuación describiremos brevemente estos tres sitios que son Tecoman, Colima Santa Bárbara y Colima Villa de Álvarez.

3.1 Tecoman

El sitio se localiza en las afueras de la ciudad de Tecoman, pasando Cofradía y dentro de las instalaciones de la Universidad de Colima. Específicamente donde se encuentran localizadas la Facultad Agropecuaria y Veterinaria. Aquí se realizaron mediciones con aberturas de arreglos triangulares de 7.5 (A-B-C), 15 (A-D-E), 30 (A-F-G) y 50 (A-H-I) metros de longitud (figura 1).

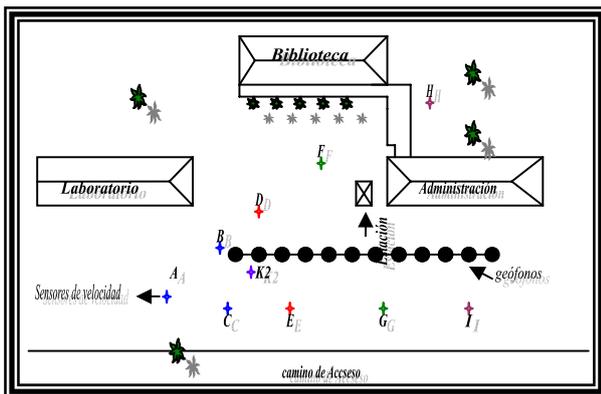


Figura 1. Distribución de arreglos SPAC en el sitio Tecoman, tanto triangulares como en línea..

En la tabla 1.5 se muestra como quedaron distribuidos los equipos Reftek usados para estas mediciones indicando así la hora de inicio de grabación y termino de grabación en GMT.

Tabla 1. Tiempos de registro para las diferentes aberturas de los arreglos triangulares con sensores Reftek en Tecoman.

Puntos realizados con los Reftek.					
Dist. Entre vértices (m).	Sensores Usados			Tiempo de registro	
	T4939	T4934	T4F60	Inicio	Termino
	Canal 1	Canal 2	Canal 3		
7.5	B	C	A	190:21:10:0 0	190:21:40:0 0
15	D	E	A	190:21:50:0 0	190:22:20:0 0

				190:22:40:0 0	190:23:10:0 0
--	--	--	--	------------------	------------------

En la tabla 2 se muestra como quedaron distribuidos los sensores verticales y el equipo k2 usados para estas mediciones indicando la hora de inicio de grabación y término de grabación en GMT.

En este arreglo el K2 permaneció en el centro (como se muestra en la figura 1 durante todo el tiempo de grabación.

Tabla 2. Tiempos de registro para las diferentes aberturas de los arreglos triangulares con sensores K2 en Tecoman.

Puntos realizados con los k2-sensores verticales					
Distancia Entre vértices (m)	Sensores usados			Tiempo de registro	
	No serie 192 canal 5	No serie 171 canal 4	No serie 172 canal 6	Inicio	Termino
15	E	D	A	190:21:00:00	190:21:40:00
30	G	F	A	190:21:50:00	190:22:20:00
50	I	H	A	190:22:40:00	190:23:10:00

3.2 Colima Santa Bárbara

El sitio se localiza en el Fraccionamiento Santa Bárbara en un Jardín, cercano a donde se encuentra un bomba de agua donde cruzan las calles de Gorrión y Águilas. La distribución de los arreglos se muestra en la figura 2. En este sitio se realizaron arreglos de 5, 15, 30 y 60 m. En las mediciones de arreglos triangulares se usaran sensores de velocidad de 30 segundos Guralp y sensores de velocidad de 5 segundos conectados a K2.

Tabla 3. Tiempos de registro para las diferentes aberturas de los arreglos triangulares con sensores Reftek en Santa Bárbara.

Puntos realizados con los Reftek.					
Dist. entre vértices (m).	Sensores Usados			Tiempo de registro	
	T4939	T4934	T4F60	Inicio	Termino
	Canal 1	Canal 2	Canal 3		
5	C	B*	A	189:17:20:00	189:17:50:00
15	D	E	A	189:18:10:00	189:18:40:00
30	G	E	A	189:18:50:00	189:19:20:00
60	I	E	A	189:19:50:00	189:20:20:00
30**	F	D	F	189:20:40:00	189:21:10:00

* en este punto el sensor tenía problemas de nivelación.

** en este arreglo se interrumpió la grabación por lluvia a las 198:20:55:00.

Tabla 4. Tiempos de registro para las diferentes aberturas de los arreglos triangulares con sensores K2 en Santa Bárbara.

Puntos realizados con los k2-sensores verticales					
Dist. entre vértices (m)	Sensores usados			Tiempo de registro	
	No serie 192 canal 5	No. Serie 171 Canal 4	No serie 172 Canal 6	Inicio	Termino

5	B	C	A	189:17:19:3 1	189:17:49:3 1
15	E	D	A	189 18:12:00	189:18:42:0 0
30	G	F	A	189:19:07:2 5	189:19:37:2 5
60	I	H	A	189:19:50:3 0	189:20:20:3 0
30	F	G	A	189:20:40:0 0	189:21:10:0 0

En la Tabla 3 se muestra como se acomodaron los sensores Guralp conectados a equipos Reftek, y la hora en GMT en que se midieron dichos arreglos.

Los puntos A y G coincidieron con la dirección del arreglo en línea, como puede observarse en la figura 2.

En la Tabla 4 muestra como quedaron distribuidos los sensores verticales y el equipo K2 usados para estas mediciones indicando así la hora de inicio de grabación y término de grabación en GMT.

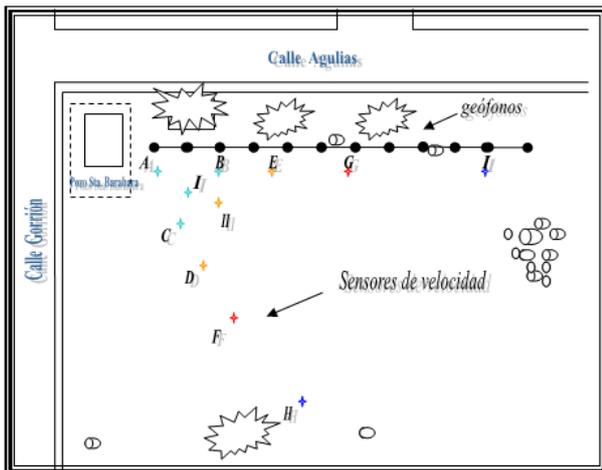


Figura 2. En esta figura se muestran gráficamente los arreglos triangulares y el arreglo lineal realizados en la colonia Santa Bárbara. El pozo donde se obtuvieron mediciones de sonda suspendida se encuentra muy cercano al punto "E".

3.3 Colima Villa de Álvarez

Este sitio se realizó en Colima, dentro de la universidad de colima (Facultades de Economía, Filosofía y la Delegación UC) campus Villa de Álvarez (figura 3).

Aquí se realizaron mediciones con aberturas de arreglos triangulares de 7.5 (A-B-C), 15 (A-E-D), 30 (A-G-F) y 50 (A-I-H) metros de longitud. Estos arreglos fueron realizados en el Jardín de la Universidad en el segundo acceso.

La tabla 5, muestra como quedaron distribuidos los sensores Guralp conectados al equipo Reftek usados para estas mediciones indicando así la hora de inicio de grabación y término de grabación en tiempo GMT.

Mientras que la tabla 6, muestra como quedaron distribuidos los sensores verticales y el equipo K2 usados para estas mediciones indicando así la hora de inicio de grabación y termino de grabación en tiempo GMT.

El equipo K2, con sensores de aceleración, permaneció ahí en el centro, como se observa en la figura 3, todo el tiempo de grabación.

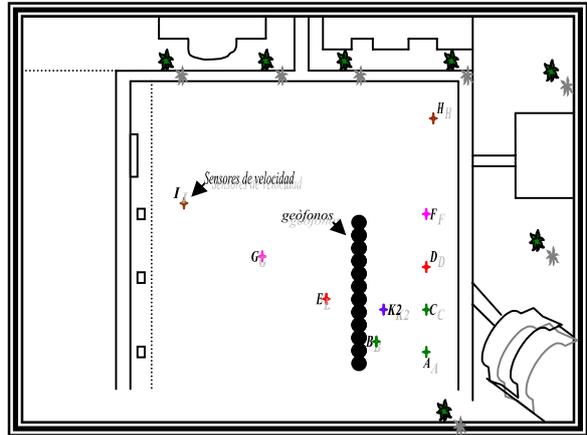


Figura 3. Distribución de los arreglos triangulares y el arreglo lineal en el sitio Villa de Álvarez. Se muestran algunos edificios como referencia.

Tabla 5 Tiempos de registro para las diferentes aberturas de los arreglos triangulares con sensores Reftek en Villa de Álvarez.

Puntos realizados con los Reftek.					
Dist. entre vértices (m)	Sensores Usados			Tiempo de registro	
	T4939	T4934	T4F60	Inicio	Término
	Canal 1	Canal 2	Canal 3		
7.5	C	B	A	194:17:00:00	194:17:30:00
15	D	E	A	194:17:50:00	194:19:00:00

Tabla 6. Tiempos de registro para las diferentes aberturas de los arreglos triangulares con sensores K2 en Villa de Álvarez.

Puntos realizados con los k2-sensores verticales					
Dist. entre vértices (m)	Sensores usados			Tiempo de registro	
	No serie 192	No serie 171	No serie 172	Inicio	Término
	canal 5	canal 4	canal 6		
15	E	D	A	194:17:05:00	194:17:35:00
30	G	F	A	194:17:50:00	194:18:20:00
50	I	H	A	194:18:35:30	194:19:05:00

Los datos anteriormente descritos fueron analizados usando dos diferentes técnicas: El método SPAC tradicional en arreglos triangulares (Flores y Aguirre, 2003) y el método SPAC adaptado a usar arreglos lineales (Chávez-García *et al.*, 2006). Nuestro propósito es evaluar la utilidad de ambos métodos para estimar la estructura de

velocidades. Comparamos nuestros resultados con estudios previos como son registros de velocidades de ondas P y S en pozo (Gutierrez et al., 1996).

4 APLICACIÓN DEL MÉTODO SPAC

A continuación se describe el procedimiento de aplicación del método SPAC tradicional que usamos para todos los arreglos. En todos los sitios estudiados se obtuvieron registros de 1800 segundos de grabación en cada una de las aperturas usada (p.e. de 5 m, 15 m., 30 m y 60m para Colima Santa Bárbara). La disposición de los arreglos se muestra en las figuras 1.2, 1.4 y 1.5. En la figura 4 se muestra un ejemplo de registros en los vértices A, I y H del triángulo de 60 metros registrado en Colima Santa Bárbara. A pesar de la larga duración de los registros, se puede observar la ocurrencia de varios transitorios que no son comunes a los tres registros. Por lo que las ventanas son seleccionadas cuidadosamente evitando estos transitorios.



Figura 4. Grafica de los registros de microtemores registrados en el sitio Santa Bárbara en la ciudad de Colima, para el arreglo triangular de 60 metros. Las unidades en el eje horizontal están en segundos y en el eje vertical están en volts.

Estos registros con tiempo común fueron divididas en 21 ventanas consecutivas de 81.92 segundos para después procesarlas. 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 muestran en la figura 5. 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.

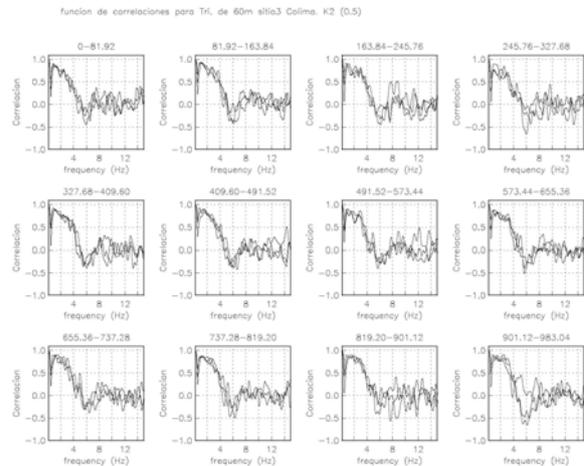


Figura 5. Ejemplo de correlaciones calculadas entre las tres estaciones para las primeras 12 de las 21 ventanas de 81.92 segundos calculadas en total.

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 6.

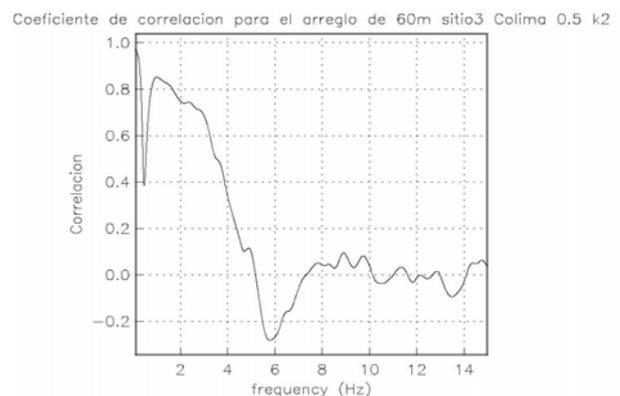


Figura 6. Ejemplo del coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo de 60m.

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(b). 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(b), 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(b) 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.

Para el caso de los arreglos en línea, se usó el sismógrafo de exploración Oyo Geospace DAS-1 con un rango dinámico de 24 bits y una línea de 12 geófonos verticales de 4.5 Hz de frecuencia natural. El intervalo de muestreo fue de 2 milisegundos. Este sistema tiene una respuesta plana entre 4.5 y 250 Hz. En cada sitio, los geófonos fueron colocados con 6 metros de distancia entre ellos, dando una distancia total de 66 m, y registrando aproximadamente 25 segundos de vibración ambiental. Se verificó en el campo que la densidad espectral de potencia para las 12 trazas fuera comparable, descartando de este modo la posibilidad de que se incluyeran en el análisis señales que no fueran comunes a todos los geófonos distribuidos. Siguiendo Chávez-García *et al.* (2006), se consideraron todas las posibles combinaciones de pares de estaciones para calcular los coeficientes de correlación. Los datos registrados fueron corregidos por línea base y se les aplicó un taper del 10 % de su duración. Después se filtraron usando un grupo de filtros pasabanda de Butterworth con ancho de 1 Hz centrados entre 3 y 40 Hz. Los coeficientes de correlación para cada frecuencia fueron calculados usando las trazas filtradas como el promedio de las cross-correlaciones de 8 ventanas de 3 segundos extraídas de los registros filtrados. Un análisis del rango de validez de las mediciones (Rodríguez y Chávez-García, 2006) indica que nuestros resultados son confiables en el rango de 5 a 20 Hz.

Los resultados para el arreglo de Santa Bárbara son mostrados en la figura 7(a). En ella se muestran los resultados para 5 ventanas junto con sus desviaciones estándar. Como referencia se ha incluido en esta grafica la curva de dispersión obtenida con los arreglos triangulares (figura 8) en línea continua.

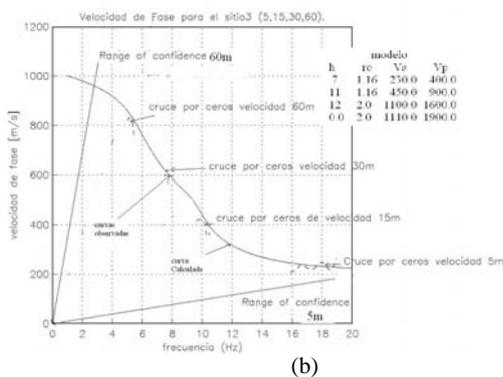
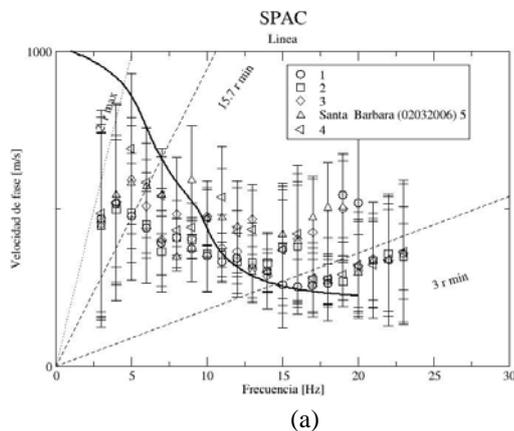


Figura 7. Curvas de dispersión observadas para el sitio Colima Santa Bárbara, (a) calculada a partir del arreglo lineal y con línea continua la curva teórica, (b) para los cuatro arreglos triangulares en línea punteada, indicando además los cruces por cero. En las dos graficas la curva teórica (línea continua) aparece como referencia y fue obtenida ajustando los datos de los arreglos triangulares (figura 8).

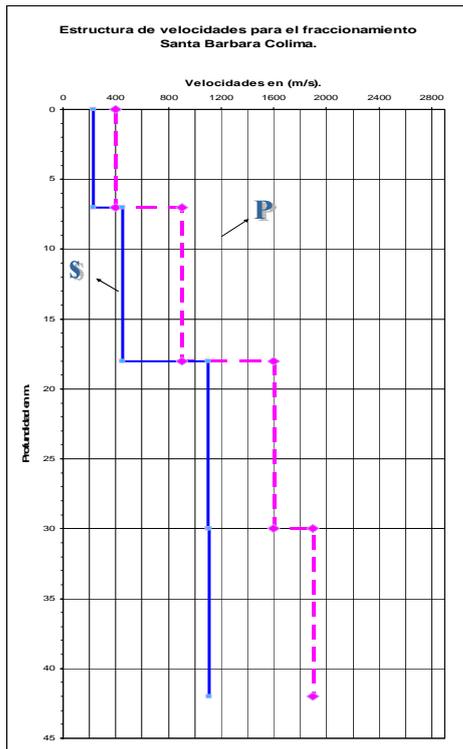
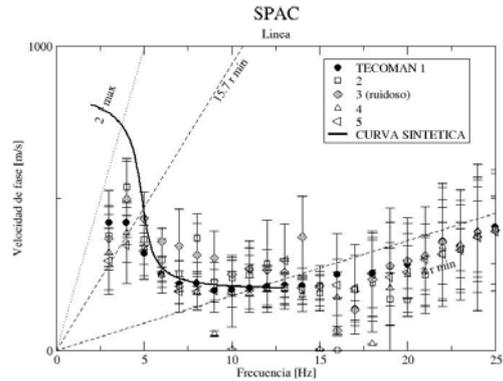


Figura 8. Perfil de velocidades para el sitio Colima Santa Bárbara, determinado a partir de los datos de los arreglos triangulares. Se muestran con línea continua la velocidad de ondas S y con línea punteada la velocidad de ondas P. Modelo utilizado para calcular la curva de dispersión en las gráficas de la figura 7.

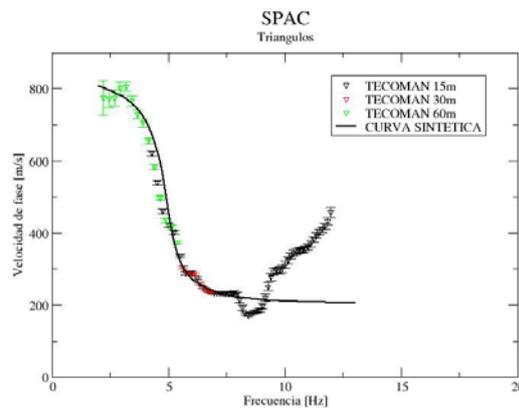
Todo este procedimiento se realizó para cada uno de los arreglos instrumentales realizados en el estado de Colima. Se muestran a continuación únicamente los coeficientes de auto-correlación y las curvas de dispersión obtenidas para cada sitio.

5 TECOMAN.

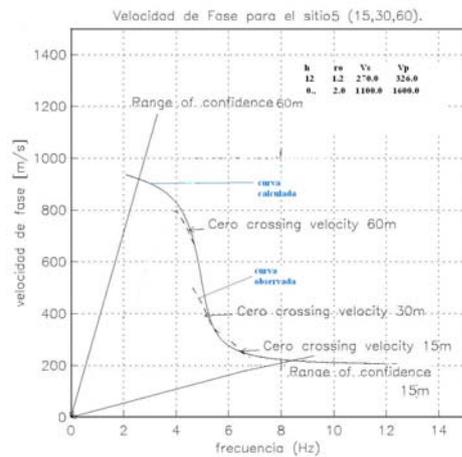
Para este sitio se obtuvo la curva de dispersión usando registros de tres aberturas de 15m, 30m y 60m (figura 9c). Con ellas se obtuvo la curva de dispersión con la que se estimó el modelo de velocidades (figura 10). Para el arreglo de 60 m, se seleccionaron 5 ventanas de 81.92 segundos, 11 para el arreglo de 30 m, y 8 para el arreglo de 15 m. Se obtuvo el promediado de los coeficientes de correlación. Con las cuales se calculó la curva de dispersión considerando también los cruces por cero. La curva de dispersión obtenida a partir del arreglo lineal se muestra en la figura 9a en donde se indica la desviación estándar y el resultado de 5 ventanas. En la figura 7b se muestra la curva de dispersión producto de los tres arreglos triangulares ensamblados y con la desviación estándar correspondiente.



(a)



(b)



(c)

Figura 9. Curvas de dispersión observadas, (a) a partir del arreglo lineal y con línea continua la curva teórica, (b) Usando los tres arreglos triangulares y mostrando la desviación estándar (c) Usando los tres arreglos triangulares donde se indican los cruces por cero y los segmentos obtenidos con cada arreglo de 15, 30 y 60 m en línea punteada. En las tres curvas se muestra la curva teórica calculada con el modelo de la figura 10.

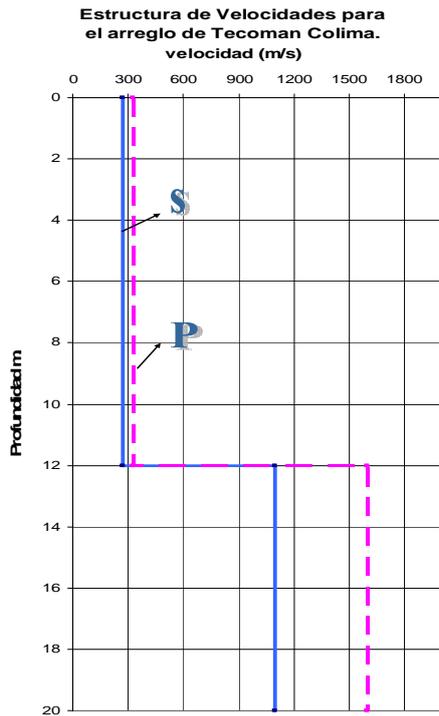
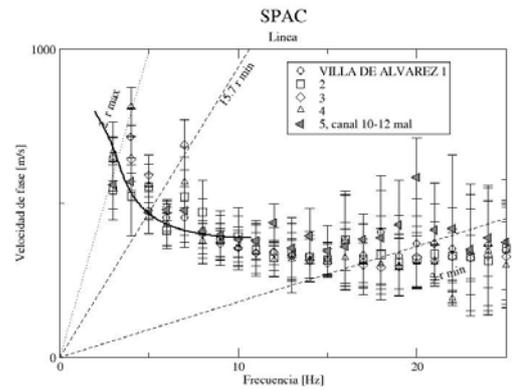


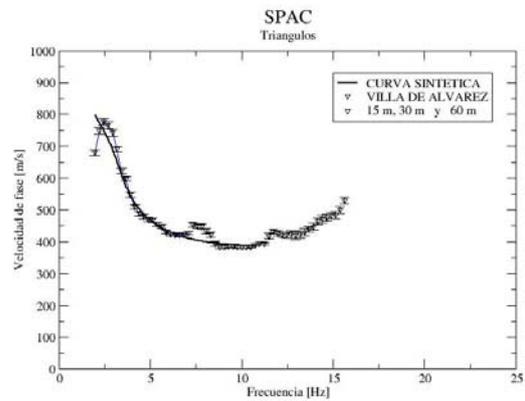
Figura 10. Perfil de velocidades para el sitio Tecoman, determinado a partir de los datos de los arreglos triangulares. Se muestran con línea continua la velocidad de ondas S y con línea punteada la velocidad de ondas P. Modelo utilizado para calcular la curva de dispersión en las gráficas de la figura 9.

6 VILLA DE ALVAREZ, COLIMA.

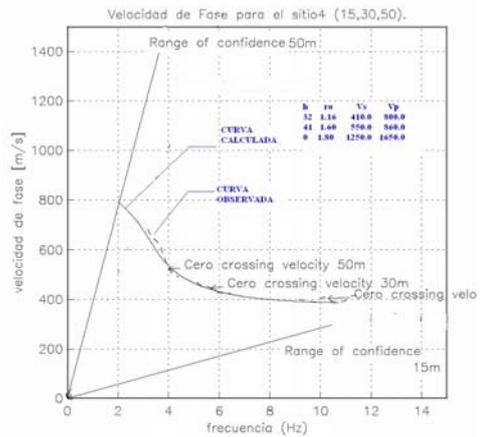
Para este sitio se obtuvo la curva de dispersión para tres aberturas una de 15 m, 30 m y 50 m con las que se obtuvo la curva de dispersión con las que se obtuvo el modelo de velocidades. Para el arreglo de 50 m se seleccionaron 15 ventanas de 81.92 segundos, 12 para el arreglo de 30 m, y 11 para el arreglo de 15 m. Con los coeficientes de autocorrelación anteriores se calculó la curva de dispersión considerando también los cruces por cero. La estructura de velocidades obtenida, correspondiente a la curva continúa de la figura 11 se muestra gráficamente en la figura 12.



(a)



(b)



(c)

Figura 11 Curvas de dispersión observadas para el sitio Colima Villa de Álvarez, (a) a partir del arreglo lineal y con línea continua la curva teórica, (b) Usando los tres arreglos triangulares y mostrando la desviación estándar (c) Usando los tres arreglos triangulares donde se indican los cruces por cero y los segmentos obtenidos con cada arreglo de 15, 30 y 50 m en línea punteada. En las tres curvas se muestra la curva teórica calculada con el modelo de la figura 10.

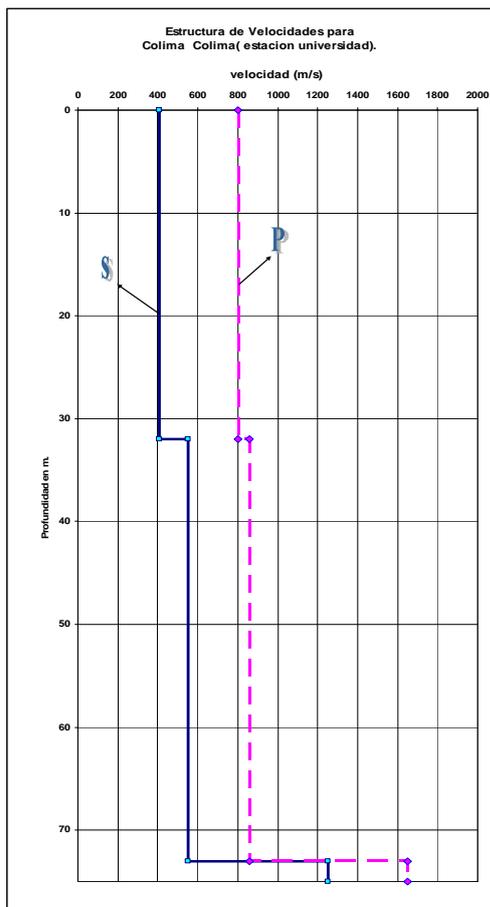


Figura 12 Perfil de velocidades para el sitio Colima Villa de Álvarez, determinado a partir de los datos de los arreglos triangulares. Se muestran con línea continua la velocidad de ondas S y con línea punteada la velocidad de ondas P. Modelo utilizado para calcular la curva de dispersión en las gráficas de la figura 7.

7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para los arreglos en línea, las funciones de coherencia obtenidas para los diferentes sitios en el Estado de Colima tienen la forma de una función de Bessel de primera clase y orden cero. Esta es una muestra más de que el intercambio entre el promedio acimutal, impuesto en la propuesta inicial del método SPAC (Aki, 1957), por un promedio temporal puede hacerse.

La frecuencia a la cual encontramos el primer cero de las funciones de coherencias (f_{pc}), son diferentes para cada sitio y también son función de la distancia entre estaciones. Por ejemplo, cuando la distancia entre estaciones fue de 6 m, la frecuencia varió entre los 15.7 Hz para el sitio Tecomán (TEC) y los 27.8 para Cerro de Ortega (CORT). Las diferencias en este valor ofrecen ciertamente información significativa sobre la velocidad de fase. La teoría de SPAC predice que el argumento de la función tiene su primer cero cuando $\left(\frac{2\pi f_{pc} r}{c(2\pi f_{pc})}\right) = 2.4047\dots$

Dado que $r = 6$ m, podemos estimar velocidad de fase de,

aproximadamente 246 y 436 m/s para los sitios TEC y CORT, respectivamente. La velocidad de fase del sitio, $v(f_{pc})$ es proporcional a f_{pc} .

La pérdida de coherencia que podemos observar en nuestras funciones, por ejemplo, para el sitio El Naranjo (NAR), la coherencia a frecuencias bajas es ya menor a 0.5, para distancias mayores de 18 m, es manifestación de la bien conocida ambigüedad de 2π , que hay cuando se trata de medir el retraso de fase. Esto debe verse reflejado en los límites de validez que imponemos a nuestros resultados.

Por otro lado, también en los arreglos en línea, debemos decir que los promedios calculados para la coherencia a diferentes distancias no han sido obtenidos de la misma manera pues para cada distancia tenemos un número diferente de funciones por promediar. Once para el caso de la distancia entre estaciones de seis metros y 1 para la coherencia obtenida para estaciones separadas 66 m.

También es claro que aún cuando comparemos coherencias obtenidas de manera similar, digamos las de 6 m en los diferentes sitios, ellas tienen variaciones diferentes. En el caso de CORT, las incertidumbres mayores aparecen desde los 20 Hz y hacia frecuencias mayores. No es así para los otros casos en que las incertidumbres mayores aparecen en el rango desde un poco antes de 10 Hz. CORT es un sitio con nivel de ruido no muy alto, el sitio está en las afueras del poblado que tiene poca circulación de autos, y la carretera pasa a aproximadamente 500 metros. No es así para los otros sitios. Las mediciones que haremos en breve yo creo que van a contestar parte de esta pregunta porque se me hace que haciendo más mediciones puede promediarse más y entonces debería disminuir la varianza.

A diferencia de los arreglos en línea en los arreglos triangulares tenemos exactamente el mismo número de datos para cada separación de estaciones sin embargo el número de separaciones entre estaciones es muy limitado (entre 3 y 5 de acuerdo al sitio). Por otro lado, el número de estaciones también puede producir restricciones adicionales si las condiciones muy particulares del sitio donde se colocaron los sensores desfavorecen el obtener buenas correlaciones entre ellos. Las ventajas que estos arreglos tienen es el ancho de banda que para los sensores de banda ancha puede generar información útil desde 0.033 Hz y para los sensores Kinometrics desde 0.2 Hz, en comparación con 4.5 Hz que corresponde a la frecuencia más baja de los sensores usados en los arreglos lineales. Para sitios como Villa de Álvarez, la curva de dispersión de velocidad de fase para los estratos superficiales menores de 70 m puede ser bien descrita dentro del rango de frecuencias válido para los sensores del arreglo lineal. La relativamente alta velocidad de los estratos superficiales ($V_s=400$ m/s para el estrato superficial) permitió esta definición dentro del rango de frecuencias mayores de 4.5 Hz. Sin embargo para los arreglos

Tecomán y Santa Bárbara vemos que justamente por debajo de 4.5 Hz los datos observados con el arreglo lineal difieren del modelo teórico y a la vez del observado con arreglos triangulares. Para estos dos arreglos la velocidad de los estratos superficiales para las ondas S es menor de 300 m/s.

Tanto en los arreglos lineales como en los arreglos triangulares la tendencia de las curvas de dispersión en alta frecuencia coincide describiendo con ello, la velocidad del estrato superficial. Para los siete sitios en que realizamos los arreglos, las velocidades de ondas S para los estratos superficiales oscilan entre 200 m/s y 500 m/s.

La velocidad del estrato más superficial es, seguramente, uno de los datos más sólidos que nos puede brindar este método. Sin embargo esto no pudo ser corroborado cuando las velocidades obtenidas con los arreglos SPAC fueron comparadas con el perfil de velocidades de ondas P y S obtenidas con sonda suspendida, ya que las lecturas de los primeros 10 m de profundidad no fueron confiables y por lo tanto no se reportaron en Gutiérrez et al (1996).

En la figura 13 se muestran las velocidades de ondas S y P obtenidas a partir de los arreglos triangulares SPAC, los arreglos lineales SPAC y las reportadas por Gutiérrez et al (1996) obtenidas con sonda suspendida. En general podemos observar que el modelo obtenido para las ondas S con el arreglo lineal coincide mejor con los datos observados para el estrato que va de 25 a 35 m de profundidad. Para el intervalo que va de 30 a 40 m de profundidad, la velocidad de ondas P coincide con lo estimado desde los arreglos triangulares. En general las velocidades de ondas S obtenidas a partir de los arreglos triangulares sobreestiman las velocidades de la sonda suspendida. Pero se puede observar una gran coincidencia entre las velocidades S obtenidas con los arreglos SPAC lineales y arreglos triangulares SPAC para los dos estratos mas superficiales que van de 0 a 18 m de profundidad aproximadamente. Hay que considerar que las mediciones de sonda suspendida son mediciones puntuales mientras que las velocidades obtenidas con SPAC tanto lineal como en arreglos triangulares muestra una especie de promediado del área en donde se instaló el arreglo.

Es interesante observar como algunos rasgos anómalos en las curvas de dispersión observadas se presentan tanto para los arreglos lineales como en los arreglos triangulares. Tal es el caso de la pequeña forma de montaña que presenta la curva de dispersión de la figura 11b en 7.5 Hz aproximadamente y que esta también presente en la figura 11a en forma de un salto para dos frecuencias de 7 y 7.5 Hz aproximadamente.

Dada la coincidencia en los resultados para frecuencias mayores de 4.5 Hz, podemos considerar que el arreglo SPAC en línea bajo las consideraciones mencionadas en Chávez-Gracia et al. (2006), resulta mas práctico en la exploración de estratigrafías someras que el método SPAC tradicional en arreglos triangulares.

Estructura de velocidades para el fraccionamiento Santa Barbara Colima.

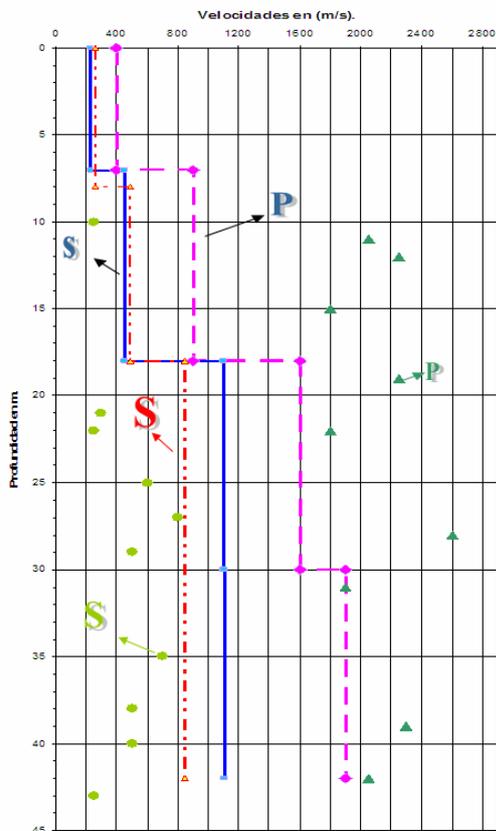


Figura 13 Perfil de velocidades para el sitio Santa Bárbara en la ciudad de Colima. La línea continua azul y la línea discontinua rosa, corresponden a la velocidad de ondas S y P, respectivamente, obtenidas con los arreglo SPAC en triángulos. La línea con puntos y rayas de color rojo corresponde a la velocidad de ondas S obtenida con SPAC en arreglo lineal. Los puntos y triángulos corresponden a la velocidad de ondas S y P, respectivamente, reportados en Gutiérrez et al. (1996) usando sonda suspendida.

8 CONCLUSIONES

En este trabajo se aplicó exitosamente el método SPAC clásico (en arreglos triangulares) y SPAC en línea. Aunque las mediciones fueron realizadas en siete sitios del estado de Colima, aquí solo se presentaron los resultados de tres sitios, Tecoman, Colima Villa de Álvarez y Colima Santa Bárbara. Los resultados obtenidos con ambos métodos coinciden dentro de su intervalo de validez. Por lo que resulta más práctico el uso del arreglo lineal para explorar estratificaciones someras ya que debido al rango de frecuencia del sistema usado en los arreglos lineales, la información esta limitada a ser no menor que 4.5 Hz. Para la detección de estructuras mas profundas es necesario el uso de sensores que permitan registrar frecuencias mas bajas. Este punto marco la diferencia en el uso de arreglos triangulares con sensores de 5 y 30 segundos.

La comparación de las Velocidades de propagación de ondas S y P obtenidas con arreglos SPAC tanto en línea como en triángulo con las velocidades obtenidas con la sonda suspendida en general mostraron una buena coincidencia.

9 RECONOCIMIENTOS

El estudio fue patrocinado por CONACYT, México, mediante el contrato SEP-2003-C02-43880. Agradecemos el apoyo para la realización de trabajos de campo de los arreglos SPAC en triángulos del Ing. Horacio Mijares Arellano y el Ing. Cesar Gutiérrez Rodríguez.

10 REFERENCIAS

- Aki, K. (1957), Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ.*, **35**: 415-456.
- Chávez-García, F. J., M. Rodríguez, and W. R. Stephenson (2005). An alternative approach to the SPAC analysis of microtremors: Exploiting stationarity of noise, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **95**, 277-293.
- Chávez-García, F. J., M. Rodríguez, and W. R. Stephenson (2006). Subsoil structure using SPAC measurements along a line, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **96**, 729-736.
- Flores-Estrella, H., and J. Aguirre G., (2003). SPAC: An alternative method to estimate earthquake site effects in México City, *Geofísica Internacional*, **Vol. 42**, No. 2, 227-236.
- Gutiérrez, C., K. Masaki, J. Lermo y J. Cuenca (1996). Microzonificación sísmica de la ciudad de Colima, Cuadernos de Investigación No. 33, CENAPRED, México.
- Miyakoshi, K., T. Kagawa, S. Kinoshita (1998), Estimation of geological structures under the Kobe area using the array recordings of microtremors, in K. Irikura, K. Kudo, H. Okada, and T. Sasatani (eds.) *The effects of surface geology on seismic motion, recent progress and new horizon in ESG study*, **Vol. 2**, 691-696, Balkema.
- Okada, H. and K. Matsushima (1989), An exploration method using microtremors (1) –A theory to identify Love waves in microtremors, *Proceedings of the 81st SEGJ Conference*. 15-18.
- Yamamoto, H. (1998), An experiment for estimating S-wave velocity structure from phase velocities of Love and Rayleigh waves in microtremors, in K. Irikura, K. Kudo, H. Okada, and T. Sasatani (eds.) *The effects of surface geology on seismic motion, recent progress and new horizon in ESG study*, **Vol. 2**, 705-710, Balkema.