

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE
MÉXICO.**

Postgrado en Ciencias de la Tierra

**ESTUDIO DE MICROTREMORES APLICANDO EL
MÉTODO SPAC PARA LAS CIUDADES DE URUAPAN
MICHOACÁN Y MONTERREY
NUEVO LEÓN.**

TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

RICARDO VÁZQUEZ ROSAS

DIRECTOR DE TESIS

DR. JORGE AGUIRRE GONZÁLEZ.

COASESOR

DR. VICTOR HUGO GARDUÑO MONROY

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS.

A DIOS POR DARMÉ LA OPORTUNIDAD DE SEGUIR EN VIDA, Y DARMÉ LA FUERZA PARA SEGUIR ADELANTE.

CON TODO EL CARINO Y A MIS PADRES AMANCIO VÁZQUEZ C. Y MA. DOLORES ROSAS M. POR SU INALCANZABLE EJEMPLO DE SUPERACIÓN, TRABAJO Y HONESTIDAD. POR HABERME BRINDADO SU APOYO DURANTE TODO ESTE TIEMPO PARA PODER CULMINAR MIS ESTUDIOS, MIL GRACIAS PAPA Y MAMA.

Y A LA MUJER DE MI VIDA POR HABERME BRINDADO TODO SU APOYO Y CARINO INCONDICIONAL EN TODO MOMENTO MI ESPOSA.

Y A MI BEBE KARLA DENISE, POR SER UNO DE MIS MAS GRANDES LOGROS EN LA VIDA (16-03-2006).

Y CON TODO CARINO MIS HERMANAS OLGA, ERENDIRA, SUSANA, VERÓNICA Y ANGELINA. QUE EN TODO MOMENTO ME MOSTRARON SU APOYO.

AGRADECIMIENTOS.

AL DR. JORGE AGUIRRE GONZÁLEZ, POR LA CONFIANZA, AMISTAD, SUS COMENTARIOS Y SUS CRÍTICAS PARA MEJORAR ESTE TRABAJO Y TODAS LAS ENSEÑANZAS A LO LARGO DE ESTE TRABAJO DE TESIS (MIL GRACIAS).

AL DR. VÍCTOR HUGO GARCINO MONROY PRINCIPALMENTE POR SU AMISTAD, SU APOYO CONFIANZA Y ENSEÑANZAS.

AL DR. JUAN CARLOS MONTALVO POR SU AMISTAD, APOYO, CRÍTICAS PARA MEJORAR ESTE TRABAJO.

AL ING. HORACIO MIJAREZ ARRELLANO POR SU VALIOSA AMISTAD, POR TODAS SUS ENSEÑANZAS, PACIENCIA, Y POR EL TIEMPO DEDICADO DURANTE EL TRABAJO REALIZADO EN CAMPO Y EN EL LABORATORIO.

Y A TODOS AQUELLOS QUE DURANTE EL TIEMPO QUE DURO ESTE TRABAJO ESTUVIERON BRINDANDO ME SU APOYO Y SU CONFIANZA. (HORACIO MIJAREZ, MOISÉS CONTRERAS, HORTENSIA FLORE, JORGE AGUIRRE, MIS COMPANEROS DE LA MAESTRIA Y DEL INSTITUTO DE INGENIERIA).

AGRADECIMIENTOS.

A INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM, POR HABERME BRINDADO SUS INSTALACIONES PARA CONSOLIDAR MI FORMACIÓN COMO PROFESIONISTA Y BRINDARME UN ESPACIO COMO BECARIO PARA CULMINAR ESTE TRABAJO DE TESIS.

A CONACYT, POR HABERME APOYADO CON UNA BECA PARA PODER TERMINAR MIS ESTUDIOS DE MAESTRIA.

ESTE TRABAJO FUE PARCIALMENTE APOYADO POR DEGAPA DEL PROYECTO DE PAPIIT IN112405-3.

ESTE TRABAJO FUE PARCIALMENTE APOYADO POR EL PROYECTO DE CONACYT DE ESTUDIOS DE PALEOSISMOLOGÍA A NOMBRE DEL DR. VÍCTOR GARDUINO MONROY.

ESTE TRABAJO FUE PARCIALMENTE APOYADO POR EL PROYECTO DE LA COORDINACIÓN CIENTÍFICA (1.17) UMSNH (DR. VÍCTOR GARDUINO MONROY).

ESTE TRABAJO FUE PARCIALMENTE APOYADO POR REGIONALIZACIÓN DEL ESTADO DE NUEVO LEÓN BASADA EN GEOLOGÍA Y VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN DE ONDAS SÍSMICAS. APOYO A LA INCORPORACIÓN DE NUEVOS PROFESORES DE TIEMPO COMPLETO, PTC. (CLAVE: PROMEP/1035/05/225).

ESTE TRABAJO FUE PARCIALMENTE APOYADO POR REGIONALIZACIÓN DEL ESTADO DE NUEVO LEÓN BASADA EN GEOLOGÍA Y VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN DE ONDAS SÍSMICAS. PAICYT, VANL. (CLAVE: CT877-04).

GRACIAS.

INDICE

Resumen	3
I. Introducción.	4
I.1. Método SPAC.	7
I.2. Análisis del método SPAC.	8
II. Primer caso. Ciudad de Uruapan Michoacán.	11
II.1 Antecedentes locales de Uruapan Michoacán	11
II.2 Contexto geodinámico y geología regional de Uruapan Michoacán.	11
II. 3 Revisión histórica de la sismicidad.	12
II. 3.1. Revisión histórica de la sismicidad de Uruapan Michoacán (1858-1943).	14
II. 3.2. Sismos Históricos.	15
II.4. Descripción histórica de la ciudad de Uruapan Michoacán.	16
III. Aplicación del método SPAC.	17
III.1 Mapa de isoperiodos de la ciudad de Uruapan Michoacán.	18
III.2 Pre-procesado.	19
III.3 Procesado.	19
III. 3.1 Triangulo 1 Uruapan Michoacán.	24
III. 3.2 Triangulo 2 Uruapan Michoacán.	26
III. 3.3 Triangulo 5 Uruapan Michoacán.	28
III. 3.4 Triangulo 8 Uruapan Michoacán.	30
III. 3.5 Triangulo 9 Uruapan Michoacán.	32
III. 3.6 Triangulo 12 Uruapan Michoacán.	33
III. 3.7 Triangulo 14 Uruapan Michoacán.	35
III. 3.8 Triangulo 3 Uruapan Michoacán.	37
III. 3.9 Triangulo 10 Uruapan Michoacán.	39
III. 3.10 Triangulo 15 Uruapan Michoacán.	41
III. 3.11 Triangulo 17 Uruapan Michoacán.	43
IV. Discusión y resultados.	45
IV.1. Conclusiones.	50
V. Parte II Aplicación del método SPAC en la ciudad de Monterrey N. L.	51
VI. Estudio de vibración ambiental aplicando el método SPAC en la ciudad de Monterrey N. L.	52
VII. Antecedentes locales de Monterrey N. L.	53
VIII. Descripción de los arreglos.	54
VIII.1 Arreglos en el estadio de la UANL.	54
VIII.2 Arreglos en la colonia Roma.	55
VIII.3 Arreglos en el lecho de río Santa Catarina.	56
VIII.4 Arreglos realizados cerca del centro de la ciudad en un predio conocido como PL4V	56
VIII.5 Equipos.	56
IX. Contexto Geodinámico y Geología Regional del Estado de Nuevo León	57
IX. A. Geología Regional del Área Metropolitana de Monterrey Nuevo León	59

X. Aplicación del método SPAC.	60
X.I Procesado de los registros.	60
XI. Arreglos realizados en el lecho del río Santa Catarina (RSC).	60
XI.1 Resultados obtenidos para el arreglo RSC 15 m.	64
XI.1.a Resultados de la curva de dispersión de los arreglos RSC.	67
XI.1.b Estructura de velocidades del arreglo RSC.	68
XII. Arreglo realizado en el sitio llamado predio de los cuatro vientos (PL4V).	69
XII.1 Arreglo PL4V 280 m.	69
XII.2 Arreglo PL4V 150 m.	71
XII.3 Arreglo PL4V 50 m.	73
XII.4 Arreglo PL4V 15 m.	75
XII.5 Resultados de la curva de dispersión de los arreglos PL4V.	78
XII.6 Estructura de velocidades del arreglo PL4V.	78
XIII. Arreglos realizados en la Colonia Roma.	80
XIII.1 Arreglo RM 150 m.	80
XIII.2 Arreglo RM 50 m.	82
XIII.3 Arreglo RM 27 m.	83
XIII.4 Resultados de la curva de dispersión de los arreglos RM.	86
XIII.5 Estructura de velocidades de los arreglos RM.	87
XIV. Arreglos realizados a un costado del estadio de la UANL (EST).	88
XIV.1 Arreglo EST 50 m.	88
XIV.2 Arreglo EST 15 m.	90
XIV.3 Arreglo EST 7.5 m.	92
XIV.4 Resultados de la curva de dispersión de los arreglos EST.	95
XIV.5 Estructuras de Velocidades de los arreglos EST.	95
XV. Resultados.	97
XVI. Conclusión.	103
XVII. conclusiones de ambos caso.	104
Referencias.	106
Apéndice. 1	111
Apéndice. 2	112

RESUMEN.

En el presente trabajo se realizan estimaciones de estructuras de velocidades por medio del uso de registros de vibración ambiental (microtremores) para elaborar mapas de Microzonificación. Este tipo de estudios que utilizan vibración ambiental, a nivel mundial ha tenido un gran auge en los últimos años. En México este tipo de estudios ha tenido un lugar preponderante, después del sismo del 19 de septiembre de 1985. En ese sismo, quedó de manifiesto la participación de los efectos de sitio arrojando como consecuencia la destrucción de muchas edificaciones en la ciudad de México.

Por otro lado uno de los problemas de la sismología es la estimación de los perfiles de velocidad confiables, ya sea para estudios de Microzonificación, localizaciones epicentrales o para modelar la respuesta de un sitio ante la incidencia de un evento sísmico. Este último es uno de los objetivos más frecuentes de los trabajos con microtremores.

En el presente trabajo se pretende estudiar los alcances del método SPAC (por su nombre en inglés Spatial Autocorrelation Method). Éste, fue propuesto por Aki (1957), y tiene el propósito de obtener el modelo estructural del subsuelo a partir de registros simultáneos de microtremores en un arreglo de estaciones. Para aplicar este método se requiere un mínimo de tres estaciones ya que está basado en la identificación de ondas superficiales que viajan en forma horizontal a través del arreglo donde son registradas.

En el presente trabajo se aplicó el método SPAC para la ciudad de Uruapan, Michoacán y para la ciudad de Monterrey, Nuevo León. Para el caso de la ciudad de Uruapan, Michoacán se analizaron 18 arreglos instrumentales de aproximadamente 1 km de apertura. De los cuales se invirtió la curva de dispersión de velocidad de fase de ondas Rayleigh para la mayoría de los arreglos considerando sólo una capa o estrato sobre un semi-espacio, arrojando una velocidad aproximada de ondas S de $V_s = 1000$ m/s para el semi-espacio y una velocidad aproximada de ondas S de $V_s = 120$ m/s para el estrato superficial, con espesores que alcanzan los 760 m. Estos resultados están basados únicamente en el análisis de algunos de los 18 arreglos.

Para la ciudad de Monterrey se estudiaron cuatro sitios de la ciudad realizando un total de 12 arreglos instrumentales en forma de triángulos equiláteros con diferentes aberturas con una máxima de 280 m y una mínima de 7.5 m en los que se llegó a invertir la curva de velocidad de fase y se determinó la estructura de velocidades para estos sitios. Se obtuvieron valores de velocidades de ondas S en los estratos superficiales que fluctúan entre 400 m/s como mínimo y un máximo de 1500 m/s. Estos resultados nos permitieron obtener datos de estratos más superficiales.

INTRODUCCIÓN.

El hecho de tener que esperar la ocurrencia de un evento sísmico para la estimación del efecto de sitio es una gran desventaja, en cuanto a tiempo y seguridad se refiere. Es por ello que en los últimos años el uso de microtremores en la estimación de efecto de sitio, se ha incrementado considerablemente.

En general el efecto de sitio se puede explicar como la respuesta que tiene cada lugar ante un evento sísmico, ya que este está influenciado por las condiciones geológicas y topográficas de cada lugar.

Los microtremores también se conocen como microsismos, ruido sísmico de fondo, oscilaciones omnipresentes o micro trepidaciones. Su definición es variada; como vibraciones en la superficie debidas a la incidencia oblicua de ondas de cuerpo, y que se propagan en todas direcciones con la misma energía; como una superposición de ondas superficiales, que constituyen un campo estacionario y homogéneo. De una manera más generalizada Aguirre González. *et al* (2001) mencionan que el ruido ambiental es generado por fuentes naturales y culturales, como el tráfico o la actividad humana.

Existen estudios anteriores a la década de los años 50 sobre vibración ambiental, todos ellos realizados en Japón, con el objetivo de estudiar los efectos de sitio locales. Kanai (1954) es considerado el padre del uso de microtremores. Él consideraba que la fuente de los microtremores era ruido blanco y que contenían, básicamente, ondas de cuerpo. Sin embargo, la idea original de Kanai y sus colegas en la década de los 50, era errónea en cuanto al origen e interpretación de los microtremores (Bard, 1998).

Gutiérrez y Singh (1992) observaron además que la amplitud espectral dependía claramente de la hora de medición, relacionada con la cantidad de tráfico vehicular. Esta observación también fue hecha por Lermo *et al.* 1998. Lermo (1992) observó una gran dependencia entre la amplitud espectral, el periodo dominante y la estratigrafía de la cuenca de México.

Chávez –García *et al.* (1994) mencionan que los registros de microtremores, o vibración ambiental, son útiles para la estimación del efecto de sitio cuando este es muy marcado y en la banda de bajas frecuencias.

Field (1994) define los microtremores como oscilaciones omnipresentes de baja amplitud originadas por perturbaciones oceánicas, atmosféricas y culturales y que, para el caso de las ciudades, su origen se asocia más con el ruido cultural.

Chávez-García y Cuenca (1998) especifican que los microtremores son una herramienta confiable para completar información acerca de la respuesta de sitio, cuando los datos de terremotos o eventos sísmicos son escasos o difíciles de adquirir.

Bard (1998) menciona algunas de las ventajas del uso de registros de microtremores: a) que pueden ser medidos casi en cualquier momento y en cualquier lugar, b) que los instrumentos para su medición y análisis son simples y c) que su medición no genera problemas ambientales.

En cuanto a las fuentes que producen los microtremores señala que:

- A periodos largos (por debajo de 0.3 a 0.5 Hz) son causados por las ondas oceánicas que ocurren a grandes distancias, y es posible encontrar buena correlación de los microtremores en estos periodos con condiciones meteorológicas de gran escala en el entorno,
- A periodos intermedios (entre 0.3-0.5 Hz y 1 Hz) los microtremores son generados por las olas del mar cercanas a las costas, por lo que su estabilidad es significativamente menor,
- Para periodos más cortos (frecuencias mayores que 1Hz), las fuentes de los microtremores están ligadas a la actividad humana.

Así mismo, la gran cantidad de trabajos que analizan registros de microtemblores con el fin de estimar los efectos de sitio, han reportado similitud con los resultados obtenidos a partir de registros de eventos sísmicos, (Gutiérrez y Singh 1992; Lermo 1998).

Pero también hay quien en algunos casos no encuentra buena similitud con los resultados, justamente por la diferencia en las propiedades de las fuentes generadoras, de los trayectos de las ondas y de que los microsismos dependen del tiempo y del sitio donde se registran (Asten 1978; Bard 1998). No obstante, los registros de microtemblores pueden ser útiles si se analizan con mucha cautela y se analizan a gran detalle, considerando también así sus recomendaciones para las mediciones en campo.

Por otro lado, Bard (1998) menciona a varios autores que ayudaron a cambiar esas ideas sobre el uso, de los microtemblores, y que propusieron técnicas (SPAC por sus siglas en inglés Spatial Autocorrelation Method, y el de Análisis Espectral Frecuencia-Número de Onda: F-k análisis) para el análisis de ruido, que suponen con mayor contenido de ondas superficiales en el registro. También cita un estudio acerca de temblores volcánicos, en el que se encontró que éstos están conformados por un 70% de ondas Love y un 30% de ondas Rayleigh. De este modo, el autor concluye que si los temblores volcánicos tienen su origen a mayor profundidad que los microtemblores, es lógico que estos últimos tengan un contenido mayor de ondas superficiales.

Por otro lado Yamamoto (1998) describe una modificación del método de autocorrelación espacial para estimar la dispersión de las ondas Rayleigh, a partir de la componente vertical de los registros de microtemblores y, la dispersión de las ondas Love a partir de las componentes horizontales. Hace mención de que si se aplican los dos efectos de ondas (Rayleigh y Love) se puede estimar con mayor exactitud la estructura de velocidades de ondas S.

Morikawa *et al.* (1998) consideran que uno de los mayores problemas del método SPAC, es el número de estaciones requeridas por Aki (1957). Por lo proponen una modificación de dicho método, utilizando solamente dos estaciones. Basándose en el hecho de que Aki (1957), solo calcula las correlaciones entre dos estaciones ya que ellos comparan los resultados. Con el método SPAC tradicional y el método de frecuencia número de onda mejor conocido como f-k, con los que obtuvieron resultados similares ya que las diferencias se pueden deber más a la naturaleza de los microtemblores, que al método utilizado en su análisis.

Reinoso (2000) se refiere a los microtemblores y a los microtemblores sin hacer ninguna distinción, definiéndolos como ruido ambiental provocado por tráfico, sismos lejanos o pequeños y por vibraciones terrestres.

Aguirre González (2001) considera que los microtemblores son la vibración ambiental causada tanto por fuentes naturales, como por la actividad humana.

Por otro lado los arreglos de los microtemblores, que además de permitirnos obtener mapas de Microzonificación, nos permite hacer una determinación de la estructura de velocidades sísmicas.

Los pioneros de los trabajos de determinación de estructura de velocidades usando microtemblores o microsismos, fueron los llevados a cabo por Aki (1957), Toksoz (1964), y Lacoss *et al.* (1969). Sus métodos de estimación de estructura de velocidades fueron usando la inversión de la curva de dispersión de velocidad de fase de las ondas superficiales que están incluidas en los microtemblores.

Por otro lado Asten y Henstridge (1984), Horike (1985), y Matsushima y Okada (1996) han utilizado la resolución de la determinación de la velocidad de fase que usa observaciones de las series de microtemblores en cuencas sedimentarias aplicando el análisis de frecuencia-Número de Onda (f-k) (Capón, 1969).

Horike (1985) aplicó el método de inversión de velocidad de fase de ondas Rayleigh para determinar la estructura de velocidades de ondas S en zonas urbanas a partir del uso de microtemores con el método que llamó f-k (frecuencia-número de onda).

Aki (1957) dio las bases teóricas del coeficiente de autocorrelación espacial definido para los datos de microtemores y desarrollando el método de Auto-correlación espacial. Invertiendo la curva de dispersión de velocidad de fase de las ondas superficiales contenidas en los microtemores usando especialmente arreglos circulares.

Henstridge (1979) también introduce la pequeña relación entre el coeficiente de correlación espacial y el modo-fundamental de las ondas Rayleigh. Okada *et al.* (1990), Matsuoka *et al.* (1996), y Okada (1998) han extendido exploraciones del método SPAC. Por lo que ha ido revolucionado su aplicación de este método ha sido empleado a lo largo de estos tipos de estudio.

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.

En el presente trabajo aplicaremos el método SPAC en las ciudades de Uruapan Michoacán y Monterrey Nuevo León. Se desarrollarán los casos en ese orden.

En el caso 1 se describe la ciudad de Uruapan Michoacán.

La ciudad de Uruapan Michoacán por su ubicación geográfica, se localiza dentro de las zonas de sismicidad importante dentro del país (zona C), esta es una de las ciudades más importantes dentro del estado y en los últimos años ha tenido un gran crecimiento poblacional y urbano.

Por lo que se considera importante realizar estudios sísmicos para evaluar el efecto de sitio y este sea considerado en el diseño de obras civiles (Vázquez Rosas R. *et al.* 2003). Y para el presente trabajo se determina la estructura de velocidades utilizando los registros de microtemores utilizados para la propuesta de Microzonificación.

Para la ciudad de Uruapan se realizaron mediciones de microtemores usando sensores Guralp CMG 40T de tres canales de banda ancha. De acuerdo a las dimensiones de la ciudad se propusieron 18 arreglos en forma de triángulos equiláteros con una distancia de 1 km entre cada uno de sus vértices. De esta manera se procuró cubrir toda la ciudad y al mismo tiempo tener el mayor número de registros posible.

Se instalaron también dos acelerómetros Kinematics K2 que se ubicaron uno en roca y otro en suelo blando. Estos acelerómetros se quedaron instalados durante un mes, dentro del cual se logró registrar un evento sísmico que fue de gran apoyo para este trabajo de investigación.

Anteriormente, con los datos de microtemores registrados, se realizó un análisis usando el método de Nakamura (ver apéndice) obteniendo así el periodo fundamental en cada estación. Se obtuvieron periodos máximos de alrededor de $T = 0.6$ s y mínimos de $T = 0.10$ s. Con estos valores de periodos se elaboró la propuesta de Microzonificación sísmica de la ciudad de Uruapan Michoacán con el fin de que pueda servir de base para estudios de riesgo sísmico así como apoyo para la elaboración o actualización del reglamento de construcción.

El objetivo del presente trabajo es aplicar el método SPAC a los datos de microtemores. Primero, calculando la curva de dispersión de ondas Rayleigh y, a partir de ella, estimando un modelo de velocidades

para cada arreglo. Después con la información de todos los arreglos, llegar ha obtener un modelo tridimensional de velocidades.

En el caso II para la Ciudad de Monterrey NL.

Monterrey, se caracteriza por su alto desarrollo industrial y es una de las zonas metropolitanas con un gran crecimiento poblacional, por lo que, es necesario dentro de los planes de desarrollo contar con estudios detallados de las características geotécnicas del subsuelo ya que son de gran importancia dentro del desarrollo de las obras civiles.

La ciudad de Monterrey a pesar de ser una de las regiones de poca sismicidad se tienen presentes algunas fallas relativamente cerca del estado de Nuevo León, donde estas a través del tiempo han presentado algunos periodos de activación, lo que este tipo de eventos no se pueden despreciar a la hora de realizar obras civiles.

En el presente estudio se utilizaron los mismos equipos de medición, que en el caso anterior en el cual se determinaron periodos dominantes, mediante el estudio de microtremores (vibración ambiental) usando H/V (de Nakamura). Aunque con el período dominante solo no dice el efecto del sitio y no nos proporciona datos de la estratigrafía.

Y con los registros de microtremores aplicamos el método SPAC en la ciudad de Monterrey Nuevo León donde se realizaron 13 arreglos instrumentales en forma de triángulos equiláteros con diferentes aberturas con una máxima de 280 m y una mínima de 7.5 m. Los equipos que se utilizaron fueron sensores Guralp de banda ancha (de hasta 40 s de período) conectados a un sistema de adquisición de datos Reftek.

Por otro lado los registros de vibración ambiental (microtremores) se registraron durante 30 minutos, en tres ventanas de 10 minutos cada una, lo que el tener mediciones de tiempo considerable, estadísticamente nos proporciona mayor confiabilidad en nuestros resultados.

I.1 Método SPAC.

Siguiendo la metodología descrita por Aki (1957), consideremos un arreglo circular de estaciones dispuestas en un arreglo circular para la observación de microtremores. Representamos ondas armónicas de frecuencia circular ω de microtremores por $u(0,0, \mathbf{w}, t)$ y $u(r, \mathbf{q}, \mathbf{w}, t)$, 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:

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

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 (SPAC). En todos los sitios de observación que se encuentran en el arreglo circular, está definido por la siguiente expresión (2)

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

Donde $\mathbf{f}(0, \mathbf{w})$ es la función de autocorrelación de la señal registrada en el centro $C(0,0)$. La integral de la ecuación (2) se reduce a:

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

Donde $J_0(\cdot)$ es la función de Bessel de primer especie y de orden cero, $c(\mathbf{w})$ es la velocidad de fase en la frecuencia \mathbf{w} . 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:

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

Donde $\text{Re}[\cdot]$ significa la parte real de un valor complejo, $S_C(\mathbf{w})$ y $S_X(\mathbf{w}; r, \mathbf{q})$ son los espectros de potencia de los microtemores en los dos sitios C y X respectivamente, y $S_{CX}(\mathbf{w}; r, \mathbf{q})$ es el espectro cruzado (cross spectrum) entre los dos sitios (C y X). Esta ecuación significa que los coeficientes SPAC son obtenidos a través del promedio de una función de coherencia normalizada definida como co-espectro (co-spectrum) entre dos sitios con respecto a la dirección \mathbf{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 \mathbf{w} a partir del argumento de la función Bessel de la ecuación (3).

I.2 Análisis del método SPAC.

La teoría del método SPAC fue desarrollada por Aki (1957). A partir de esta teoría muchos autores han tratado las ondas de microtemores como una sola propagación de ondas, no-dispersivas y con dirección constante, mientras que por otro lado han manejado la posibilidad de un múltiplo dispersivo, es decir, la propagación de ondas en todas direcciones. Por lo que han ido agregando refinamientos al método.

La esencia de este método, es que cuando grabamos en arreglos instrumentales, a distancias equidistantes entre las estaciones, formando pares de estaciones a diferentes azimuts, es posible estimar la velocidad de fase por el cruce de las ondas en los arreglos, esto sin considerar la dirección de propagación de las ondas presentes. Esto considerando que el campo de ondas dispersivas se propague a lo largo de una superficie libre.

El método asume que el campo de ondas se empieza a grabar en los arreglos de estaciones, y la vibración ambiental se considera estacionaria y estocástica. Considerando el campo y la vibración en el espacio y el tiempo.

Donde nos permite considerar el campo de ondas estocástico formado por la superposición de varios planos de ondas que se propagan en varias direcciones en el plano horizontal, no polarizado, y todas ellas con su propagación de velocidad de fase constante c Aki, (1957).

Los microtemores son localizados en dos sitios de la superficie, (x, y) y $(x+\mathbf{x}, y+\mathbf{h})$, los podemos escribir como $\mathbf{u}(x, y, z)$ y $\mathbf{u}(x+\mathbf{x}, y+\mathbf{h})$. Y la función de autocorrelación espacial queda definida como $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{h}, t)$.

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{h}, t) = \overline{\mathbf{u}(x, y, t) \mathbf{u}(x+\mathbf{x}, y+\mathbf{h}, t)} \quad (5)$$

En el método se observa la relación entre el espectro del tiempo y el espectro en el espacio, se asume que ambas ondas son estacionarias en el espacio. Bajo de esta supocisión se define la función de autocorrelación espacial para la distancia r :

Y tenemos que las coordenadas polares sustituyéndolas en la ecuación (5) obtenemos que $\mathbf{x} = r \cos \mathbf{j}$ y $\mathbf{h} = r \sin \mathbf{j}$; donde quedan definidas r y \mathbf{j} por las coordenadas polares.

$$\bar{f}(r, \mathbf{j}) = \langle u(x, y, t) \bullet (u + r \cos \mathbf{j}, y + r \sin \mathbf{j}, t) \rangle$$

Donde $\langle u(x, y, t) \bullet (u + r \cos \mathbf{j}, y + r \sin \mathbf{j}, t) \rangle$ representa el promediado en el tiempo, y toma el promediado azimutal de esta función (Aki, 1957, ecuación 37):

$$\bar{f}(r) = \frac{1}{p} \int_0^p f(r, \mathbf{j}) d\mathbf{j} \dots \quad (6)$$

De donde, Aki (1957) demuestra que en el caso de un modo simple escalar de onda la velocidad de fase c (\mathbf{W}), el promedio azimutal y la función de autocorrelación espacial $\bar{f}(r)$ del campo de ondas está relacionado al espectro de poder temporal Φ por la siguiente ec (7) (Aki, 1957, ecuación 39).

$$\bar{f}(r) = \frac{1}{p} \int_0^a \Phi(\mathbf{w}) J_0\left(\frac{\mathbf{w}}{c} r\right) d\mathbf{w} \quad (7)$$

Por otro lado Aki (1957) menciona que esta ecuación (7) es derivada por el uso de la transformada de Hankel. Es claro que esta ecuación corresponde para ondas dispersivas en dos dimensiones, de donde J_0 es la función Bessel de orden cero. Nótese que el argumento de la función Bessel se puede escribir como

$$\frac{\mathbf{w}}{c} r = kr = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (8)$$

Donde k es el número de onda y λ es la longitud de onda de la ecuación (7) Aki, (1957). También aplica para el caso de ondas dispersivas, mostrado por Aki (1957). Donde solo se necesita sustituir a c por $c(\mathbf{W})$. y considerando la aplicación de un filtro pasa bajas a las señales. Por lo que, podemos escribir la densidad como.

$$\Phi(\mathbf{w}) = P(\mathbf{w}_0) \mathbf{d}(\mathbf{w} - \mathbf{w}_0), \quad (9)$$

Donde $P(\mathbf{w}_0)$ es el espectro de poder de densidad espectral a frecuencia \mathbf{w}_0 y $\mathbf{d}(\mathbf{w})$ es la delta de la función de Dirac, en este caso el promedio azimutal de la función de autocorrelación espacial (Aki, 1957, ecuación 41). La podemos escribir como

$$\bar{f}(r) \equiv \bar{f}(r\mathbf{w}_0) = P(\mathbf{w}_0) J_0\left(\frac{\mathbf{w}_0}{c(\mathbf{w}_0)} r\right) \quad (10)$$

Ahora permite definir el coeficiente de autocorrelación como (Aki, 1957).

$$\mathbf{r}(r, \mathbf{w}_0) = \frac{\mathbf{f}(r, \mathbf{j}, \mathbf{w}_0)}{\mathbf{f}(0, \mathbf{j}, \mathbf{w}_0)} \quad (11)$$

Como $P(\mathbf{w}_0)$ no depende de la posición, entonces podemos escribir el promedio azimutal finalmente del coeficiente de autocorrelación espacial como

$$\mathbf{r}(\mathbf{w}; r) = J_0 \left(\frac{\mathbf{w}r}{c(\mathbf{w})} \right), \quad (12)$$

Las coordenadas armónicas de microtrémores con frecuencia circular \mathbf{w} se pueden representar por $u(0, 0, \mathbf{w}, t)$ y $u(r, \theta, \mathbf{w}, t)$, las cuales se observan en el centro del arreglo $D(0,0)$ y en el punto $C(r, \theta)$ del arreglo, respectivamente. La función de autocorrelación del espectro de la estación central $D(0,0)$ se define como:

$$S_o(f) = E[D_o^*(f) \bullet D_o(f)] \quad (13)$$

Donde:

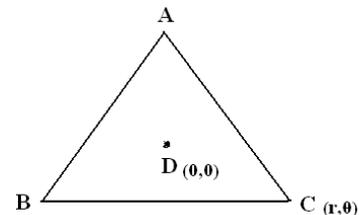
$D_o(r, \theta, f)$ es el espectro de potencia.

D_o^* es el complejo conjugado.

E es la esperanza.

Para el punto exterior $X_o(r, \theta)$, la función de autocorrelación esta dada por:

$$S_o(r, \mathbf{q}, f) = E[D_o^*(f) \bullet D_j(r, \mathbf{q}, f)] \quad (13^a)$$



Finalmente, el coeficiente de correlación espacial entre las dos estaciones está dado por (ec. (4)).

$$\mathbf{g}_{0j}(r, \mathbf{w}, \mathbf{q}) = \text{Re} \left[\frac{S_{oj}(r, \mathbf{q}, f)}{\sqrt{S_o(f) \bullet S_j(r, \mathbf{q}, f)}} \right] \quad (14)$$

Para obtener el coeficiente en todas las direcciones del arreglo, se calcula la integral que se implica con la función Bessel de primer especie y de orden cero J_0 retomando la ecuación 12 y sustituyendo variables tenemos que

$$\mathbf{r}(r, f) = J_0 \left(\frac{2\pi f}{c(f)} r \right) \quad (15)$$

Donde:

$c(f)$ es la velocidad de fase
 r es el radio entre estaciones

Con los registros experimentales se calcula el coeficiente de correlación $r(r, f)$, es decir $J_0\left(\frac{2\pi f}{c(f)} r\right)$, de donde podemos obtener la curva de dispersión $c(f)$, despejando de la ecuación este término.

II. PRIMER CASO CIUDAD DE URUAPAN MICHOACÁN.

La ciudad de Uruapan Michoacán se localiza al oeste del estado de Michoacán ($19^{\circ}25'00''$; $102^{\circ}04'00''$) a una altura de 1,600 m sobre el nivel del mar. Su superficie es de 830.28 kilómetros cuadrados y representa el 1.39 por ciento del total del estado. Es una de las más importantes dentro del estado ya que ha tenido un gran desarrollo en cuanto a población y vivienda.

II.1. Antecedentes locales de Uruapan Michoacán.

Localización: Se localiza al Oeste del estado a una altura de 1,600 m sobre el nivel del mar. Su superficie es de 830.28 Km² y representa el 1.39% de total del estado.

Su Población y Vivienda.

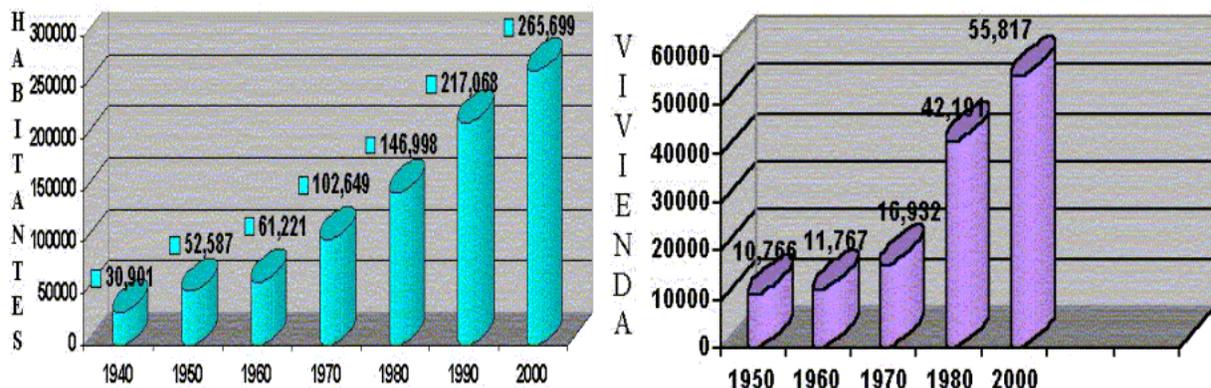


Figura 1. Crecimiento de población y crecimiento de vivienda (INEGI, 2001).

Como podemos observar en la figura 1 es muy clara la diferencia de población entre 1980 y 2000 que es de 119000 habitantes y equivale a un crecimiento poblacional del 80.95 % en 20 años. Mientras que en vivienda se tiene registrada del año 1970 al 2000, una diferencia de 38,885 viviendas que representaría el 229.65 % de crecimiento de vivienda en 30 años.

II. 2 Contexto geodinámico y geología regional de Uruapan Michoacán.

La ciudad se desarrolla en una Zona de acumulación que forma parte de la cuenca del río Cupatitzio. Esta depresión genera que depósitos provenientes de los volcanes monogenéticos rellenen a esta depresión, donde de esta manera se reconocen de la base a la cima de esta ciudad, (ver fig.2).

La ciudad de Uruapan se localiza en un límite sur del Cinturón Volcánico Mexicano, en una depresión que fue ocupada por el vulcanismo monogenético del corredor Tarasco, y descansa sobre rocas graníticas que afloran a pocos kilómetros al sur de la ciudad (ver fig. 2).

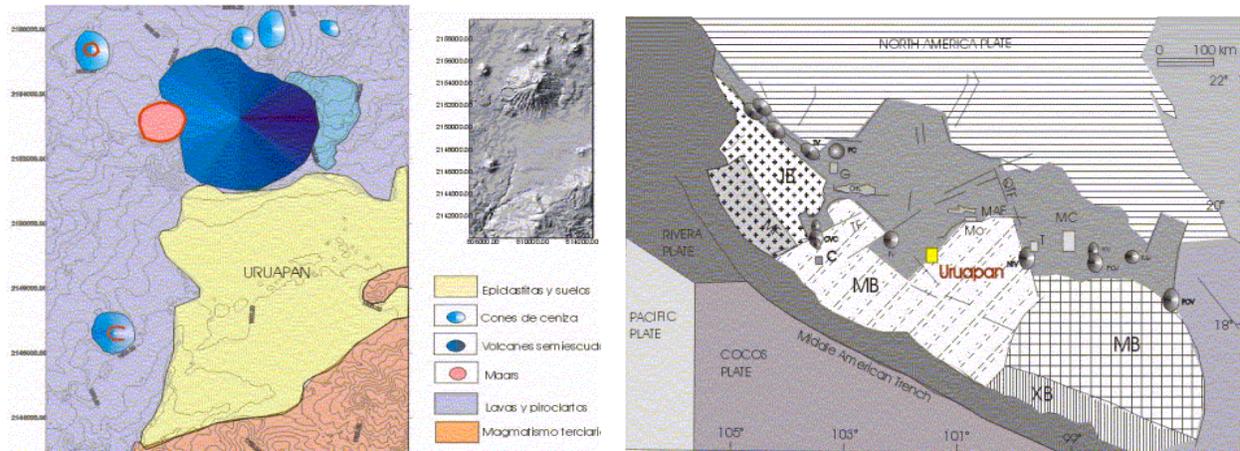


Figura 2. Geología de la ciudad de Uruapan (izquierda) y ambiente tectónico regional (derecha).

En Michoacán el fenómeno de los terremotos es una realidad que desde hace siglos ha causado daños en varias poblaciones del estado. Su ubicación geográfica es la principal causa de estos acontecimientos, ya que por un lado, Michoacán se encuentra en el límite de dos placas tectónicas (la placa de Cocos y la placa Norteamericana), además de estar ligado al proceso de subducción.

Por su parte, Garduño-Monroy *et al* (1999) afirma que los arcos volcánicos del Mesozoico (terreno Guerreo) y la Tectónica edificaron a la Sierra Madre del Sur, ésta es una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias donde se desarrollaron algunas incipientes plataformas calcáreas o en otros casos secuencias dístales de rocas terrígenas tipo turbiditas. Estas secuencias han sido deformadas por dos fases plicativas durante el Cretácico superior, por una tectónica de fallas transcurrentes del Mioceno y por una tectónica primero transtensiva y después distensiva, que afecta al Cinturón Volcánico Trans-mexicano.

II.3 Revisión histórica de la sismicidad.

El estado de Michoacán se encuentra dentro de las zonas donde sean generados sismos importantes, así como también, se tienen tres fuentes potenciales de generación de sismos:

*Los generados por la actividad Volcánica (como los sismos que se produjeron en las erupciones de los volcanes Jorullo en 1759 y Parícutín en 1943).

*Los generados por la Tectónica.

- Subducción: sismos producidos por la Placa de Cocos, estos sismos ocurren a profundidades de entre 10 y 50 Km. aproximadamente como ejemplo podemos mencionar los sismos de, 1979 (M 7.4) y 1985 (M 8.1).

- Intraplaca (rompimiento de litósfera oceánica subducida): son producto de la subducción pero con epicentro dentro de la placa oceánica bajo el continente. Son sismos poco frecuentes y a mayores profundidades (alrededor de 60 Km.) donde la placa comienza a fundirse, pero que pueden causar grandes daños.

- Fallas Locales (intraplaca dentro de la placa continental). Puesto que los sismos producto de las fallas locales son focos superficiales, esto provoca que la energía liberada, producto de un evento de este tipo incida casi directamente (por ejemplo Falla de Acambay 1912, $M = 7.0$)

* Y eventualmente los inducidos (por ejemplo construcción de presas).

Por lo cual es importante tener conocimiento de cómo se va a comportar el suelo ante un evento sísmico, ya que en la actualidad no se conocen los parámetros de seguridad de riesgo sísmico de cada ciudad, por lo que, los reglamentos de construcción se basan en el establecido para la ciudad de México.

El estado de Michoacán a través de la historia, ha sido testigo de infinidad de movimientos telúricos, como el de 19 de Junio de 1858 ($M = 7.0$), o el del 19 de Septiembre de 1985 ($M = 8.1$), que provocaron pérdidas humanas y materiales. El estado de Michoacán, está ubicado en las zonas de mas alta sísmicidad, como se observa en el mapa de 49 isosistas de sismos importantes ocurridos en México en le periodo de 1945-1985 (UNAM, CENAPRED), la zona de estudio se localiza en la región donde se tienen registradas intensidades mayores a 7 dentro de la escala de Mercalli Modificada; en la figura 3 se muestra el número de eventos ocurridos en ese periodo. Para tener una mejor idea de la situación sísmica de la ciudad de Uruapan Michoacán, se muestra con un punto en el mapa de intensidades sísmicas de la Republica Mexicana (figura 3), de esta forma podemos ver que la ciudad esta ubicada en una de las zonas de mayor intensidad sísmica.

Mapa de intensidades de la sísmicidad la república Mexicana representando el acumulado para Uruapan Michoacán a partir de 1945-1985 (CENAPRED).

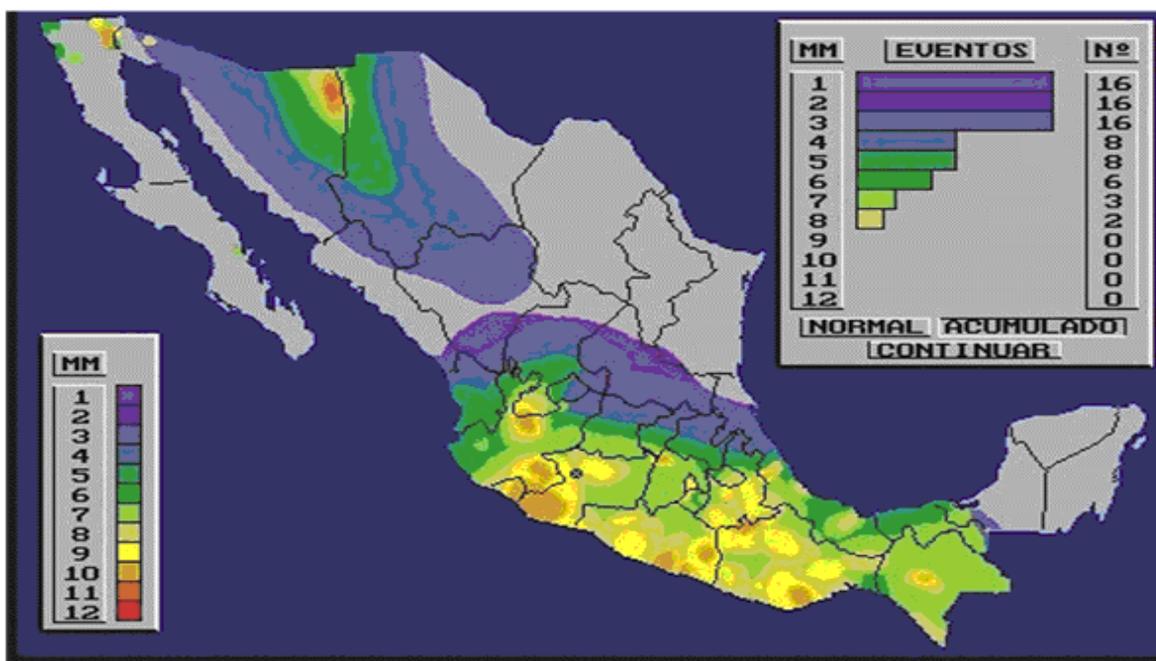


Figura3. Mapa de isosistas acumulado de 1945-1985(UNAM-CENAPRED).

El Estado de Michoacán forma parte de una de las zonas con mas alta sismicidad de nuestro país, donde se han generado sismos históricos de más de 8.0 grados de magnitud (Jara y Sánchez, 2001) por lo que se realizó una recopilación histórica desde 1858 y 1943.

II.3.1 REVISIÓN HISTÓRICA DE LA SISMICIDAD DE URUAPAN (1858 – 1943).

En este párrafo se describen algunos datos históricos de eventos sísmicos que se han sentido en la ciudad de Uruapan (García y Suárez ,1996).

19 de junio de 1858, Uruapan, Terremoto espantoso, 9:05 am. Donde el sacudimiento causó fuertes daños de templos y casas y varias desgracias personales.

19 de Julio de 1882. Uruapan, Temblor de Trepidación. De (...) 1 a 2:25 pm.

9 de Febrero de 1886. Uruapan, Temblor de Oscilación de Sur a Norte. De 3:30 am, fuerte sacudimiento, por espacio de 2 s. Después se repitió media hora.

12 de Noviembre de 1891. Uruapan, Fuerte Temblor Oscilatorio de SE a NE. de 10: 11 am Con duración de 3 s.

16 de Marzo de 1895. Uruapan, 2 Temblores uno de Trepidación y otro Oscilatorio con intervalos de s.

5 de Abril de 1895, (...) Fuerte temblor oscilatorio S a N. entre 2: 30 y 3.00 am con duración de 3 y 4 s que repitió como a los 5 s.

18 de Enero de 1906, Uruapan, Temblor Trepidatorio, de 12:15 pm con una duración de 5 s y prolongados ruidos subterráneos.

20 de Agosto 1906, Uruapan, Temblor Oscilatorio y Trepidatorio dirección NO a SE, a las 11:54 pm. con duración de 25 s.

14 de Abril de 1907, Uruapan, Temblor Oscilatorio de NS, a las 00:35 am.

12 de Mayo de 1910, Uruapan, Temblor Oscilatorio NO-SE duración de 55 s.

7 de Junio de 1911, Uruapan, Temblor Oscilatorio NS con una duración de 2 minutos y M=4 causó varios desperfectos en algunos edificios.

31 de Enero de 1912, Uruapan Temblor Oscilatorio, con una duración de 8 s.

14 de Febrero de 1943, sentidos ligeros en Uruapan (...).

23 de Marzo de 1943, Uruapan Temblor Oscilatorio sentido fuerte.

En esta parte del trabajo se realizó un gran esfuerzo, para completar la recopilación histórica del estado. Trabajos similares realizados en el intento de tener una información lo mas completa y apegada a la realidad histórica de los sismos en el estado, son los trabajos realizados por: Martínez B. A. y Javier C. C., (1991); García A. V., (1992) y Garduño Monroy V. H. y Escamilla T. R. (1996). En los cuales se presentan varias descripciones de tal y como las personas sintieron los distintos movimientos telúricos en cada población del estado. Los datos proporcionados por Martínez y Javier (1991) son a partir del año de 1573. Por tanto consideramos importante que todos los documentos que mas adelante serán presentados sean tomados con las reservas correspondientes, debido a que algunas de las fuentes podrían exagerar los hechos lo cual proporciona algunos errores en la determinación de valores en un trabajo determinado. La recopilación de material no incluyó la información proporcionada por los periódicos, debido a que estos se consideran una fuente poco confiable de información.

II.3.2. Sismos Históricos.

En el estado de Michoacán se tiene noticias de haberse observado los sismos desde antes de la llegada de los españoles, encontrado en un registro de la lamina XLII de la relación de ceremonias y ritos y población y gobierno de los indios de la provincia de Michoacán (1541); y otro que da inscrito en la relación de Zacatula, levantada en el año de 1580 en donde se menciona que “las casas que hay en esta provincia son todas de baxas, armadas sobre unos horcones de madera con unas varas atravesadas y embarradas que hacen pared, y son cubiertas todas de paja, la tierra no sufre otras causas a causa de los fuertes temblores de tierra.” (Garduño-Monroy V. H., et. al., 1998).

Durante el Siglo XVI los sismos se les atribuían a la furia de los dioses, los cuales en venganza por alguna desobediencia hacia que la tierra se moviera, causando gran pánico y desolación entre nuestros antepasados (Nava A., 1998).

Por otro lado la información que se presenta se acudió al AHMM Archivo Histórico Municipal de Morelia, AHMCR Archivo Histórico Manuel Castañeda Ramírez, AHCM Archivo Histórico de la ciudad de Morelia, APP Archivo Parroquia de Pátzcuaro y AGN Archivo General de la Nación estos.

Si embargo no fue sino hasta a mediados del siglo XVII, en el cual se presentan los primeros informes en forma de as autoridades existentes a los daños producidos por los terremotos, principalmente emanados de las autoridades eclesiásticas las cuales a su vez los atribuían a las fuerzas divinas, y cada vez que sucedía un terremoto elevaban oraciones, para pedir clemencia a Dios por sus pecados (Archivo Histórico Municipal de Morelia (AHMM), Archivo Histórico Manuel Castañeda Ramírez (AHMCR)).

No fue sino hasta fines del siglo XVIII y principios del siglo XIX, cuando se comienza a dar una explicación lógica a los fenómenos sísmicos en el estado. Un ejemplo muy claro de esto se da con la erupción del volcán el Jorullo en el estado de Michoacán en el cual se presentan una serie de explicaciones científicas, desarrolladas en aquel tiempo (ver informe con fecha 1º de abril de 1759 del AHMM).

A continuación se presenta todos los documentos encontrados en nuestra recopilación de la ciudad de Uruapan Michoacán y de algunos lugares de Michoacán.

I.4 Descripción histórica de la sismicidad de la ciudad de Uruapan.

- 1882,19 de julio, Uruapan, Tacámbaro, Mich.
 “ [...] a 2 h 25 m. p.m. temblor de trepidación.”
 SDN, 21 jul. 1882: 2 (H)
- 1886, 9 de febrero
 Cherán, Mich.
 “A las tres y media de la mañana se sintió en Cherán, municipalidad de Uruapan, Michoacán, un temblor de tierra de oscilación de su a norte en fuerte sacudimiento, por espacio de dos s; media hora después se repitió el movimiento unos instantes.” SDN, 20 feb. 1886: 2 (H).
- 1891, 12 de noviembre
 Apatzingán, Uruapan, Paracho, Purépero, Mich.
 “[...] a las 11 y 10 minutos de la mañana, se sintió un fuerte temblor oscilatorio de SE a NE en el distrito de Apatzingán; igual fenómeno en la misma fecha y a la misma hora, con duración de tres s, se hizo sentir en Uruapan, Paracho y Purépero.”
 SDN, 19 nov. 1891: 3 (H)
- 1891, 12 de noviembre
 Apatzingán, Uruapan, Paracho, Purépero, Mich.
 “[...] a las 11 y 10 minutos de la mañana, se sintió un fuerte temblor oscilatorio de SE a NE en el distrito de Apatzingán; igual fenómeno en la misma fecha y a la misma hora, con duración de tres s, se hizo sentir en Uruapan, Paracho y Purépero.”
 SDN, 19 nov. 1891: 3 (H)
- 1895, 16 marzo
 Uruapan, Aguililla, Apatzingán, Taretán, Parácuaro, Mich.“ [...] se sintió en muchos pueblos del estado un temblor oscilatorio y de trepidación, de intensidad y duración diferente en cada lugar: Uruapan: sintiéndose en esta ciudad, con intervalos de s, dos temblores, el primero trepidatorio y el segundo oscilatorio. Aguililla: [...] se sintió fuerte temblor trepidatorio y oscilatorio de S a N duración 20 s, se repitió ligeramente a las 4 y 48, no ocurrió novedad alguna. Hubo también ruidos subterráneos. Apatzingán: [...] sintiéndose en ésta ligero temblor, al principio trepidatorio y después oscilatorio. Taretán: [...] sintiéndose en ésta, con intervalos de algunos s, dos temblores oscilatorios [...] Parácuaro: [...] sintiéndose fuerte temblor al principio trepidatorio y después oscilatorio. No hubo novedad.”
 POM, 21Mar. 1895:6(H)
- 1885, 5 de abril
 Uruapan, Mich.“[...] fuerte temblor que repitió como a los 5 s.”
 POM, 21 mar.1895: (H)
- 1906,18 de enero
 Uruapan, Mich.
 “[...] a las 12h 15 m p.m., temblor trepidatorio, duración 5 s y prolongados ruidos subterráneos.”
 Instituto, 1909^a: 429 (B)
- 1906,20 de agosto
 Uruapan Mich.
 “[...]a las 11hrs. 54m. Pm. se sintió ligero el temblor oscilatorio y trepidatorio, dirección NO a SE de 25s De duración.”
 Instituto, 1909 a:437(B)
- 1906, 31 de diciembre
 Uruapan, Mich.
 “[...] a las 1 h 37 m. a.m., se sintió un ligero temblor oscilatorio con dirección de N a S y duración de 15 s.”
 Instituto, 1909 a: 439 (B)
- 1907 14 de abril,
 Jalapa, Ver.; Uruapan, Conuy, Mich.; Teotitlán, Oaxaca.; Ixtapan del Oro, Edo de Méx.
 “A las 23:32. Jalapa: mediano; 0 m 25 s; E a 0; oscilatorio. Uruapan: 0 m 35 s.; N a S; oscilatorio; fuerte Conuy: fuerte; 0 m 45 s.; oscilatorio. Teotitlán:
 1 m 20 s; E a 0; ruidos subterráneos; oscilatorio; fuerte. Ixtapan del Oro: oscilatorio; 1 m 00 s; NE a SO; repitió a las 23 h 45 m”
 Instituto, 1909^a: 442 (B)
- 1910, 12 de mayo
 Uruapan, Mich.
 “Cancani: III; osilatorio; 55 s; NO-SE.”
 Instituto, 1911b: 534 (B)
- 1911, 7 junio
 Uruapan, Mich.; Zacoalco, Jal.; Yautepec, Morelia.
 “Uruapan: Cancani: IV; oscilatorio; 2 min.; N a S; causó varios desperfectos en algunos edificios. Yautepec: Cancaní: II; oscilatorio; 57 s. Zacoalco: Cancaní: III; oscilatorio; 1 min, 50 s; S-N.”Instituto, 1913: 68-70 (B)
- 1912, 31 enero
 Uruapan, Mich.“Cancani: III; oscilatorio; 8 s.”
 Instituto, 1914: 340 (B).

El último dato que se encontró como reseña histórica de los sismos ocurridos en el estado es de 1912, ya que en 1910 se instala de la red Sismológica Mundial, la cual permitió obtener información instrumental.

En los reportes anteriores podemos observar el papel tan importante que jugaba la iglesia desde un punto de vista tanto Político como Económico, ya que era esta la encargada de informar a las autoridades los daños que se producían cuando se presentaba un sismo. Aunque también las autoridades de cada uno de los municipios presentaban sus informes, estos por lo regular tardaban un mayor tiempo en llegar a la Ciudad de Morelia.

De acuerdo a lo anterior también podemos decir que los eventos más significativos que se encontraron en los anteriores escritos, son sin duda alguna los temblores premonitores que se dieron en el transcurso del año de 1759 ante el nacimiento de volcán el Jorullo, y los de 1845 y 1858 los cuales causaron gran destrucción en todo el estado pero principalmente en la región de Pátzcuaro.

La investigación y recopilación de la información anterior, nos muestra claramente la preocupación de una manera más importante de la iglesia y de la población civil, ya que en realidad los que resultaban más perjudicados en su gran mayoría eran los templos, no obstante algunos estudiosos de la época ya comenzaban haciendo sus deducciones de las causas de estos siniestros.

En otros documentos podemos también observar que el caso del terremoto de 1858 el entonces gobernador de la Ciudad de Morelia manda se investigue la razón de los movimientos telúricos.

Es importante resaltar que investigaciones de este tipo sirven para realizar los mapas de isosistas, con los cuales se pueden reconstruir y hacer escenarios de los daños que pudieron ser causados ante la presencia de un evento determinado.

III. APLICACIÓN DEL METODO SPAC.

En la ciudad de Uruapan se realizaron mediciones de microtemblores usando sensores Guralp CMG 40T de tres componentes de banda ancha. De acuerdo a las dimensiones de la ciudad se propusieron 18 arreglos en forma de triángulos equiláteros, de una distancia aproximada a 1km y 950m. Ésta última abertura se realizó por que algunos sitios, eran sitios inaccesibles. Por lo que se procedió a realizar, algunos de estos arreglos con aberturas de 950m entre cada uno de sus vértices. Procurando cubrir toda la mancha urbana de la ciudad, y al mismo tiempo tener el mayor número de arreglos posible.

Se instalaron también dos acelerómetros Kinematics K2 que se ubicaron en dos tipos de suelo: uno en roca y otro en suelo blando. Estos acelerómetros se quedaron instalados durante un mes, dentro del cual se logró registrar un evento sísmico que fue de gran apoyo para este trabajo de investigación. (Figura 4)



Figura4. Muestra el equipo utilizado para este estudio en el orden de izquierda a derecha muestra primero el Sensor guralp triaxial de periodo largo, observando en la parte intermedia el digitalizador Refteck conectado a un disco duro SCI y por ultimo el acelerómetro k2u utilizado para las estaciones fijas.

Vázquez Rosas R. (2002-2003) realizó anteriormente un estudio con los datos del presente trabajo de microtremores usando el método de Nakamura obteniendo así el periodo fundamental. En el cual se determinaron periodos máximos de alrededor de $T = 0.6$ s y mínimos de $T = 0.10$ s. Con estos valores de periodos se elaboró la propuesta de Microzonificación sísmica de la ciudad de Uruapan Michoacán (figura 5) con el fin de que este mapa pueda servir de base para estudios de riesgo sísmico así como apoyo para la elaboración o actualización del reglamento de construcción.

III.1 Mapa de isoperiodos de la ciudad de Uruapan Michoacán.

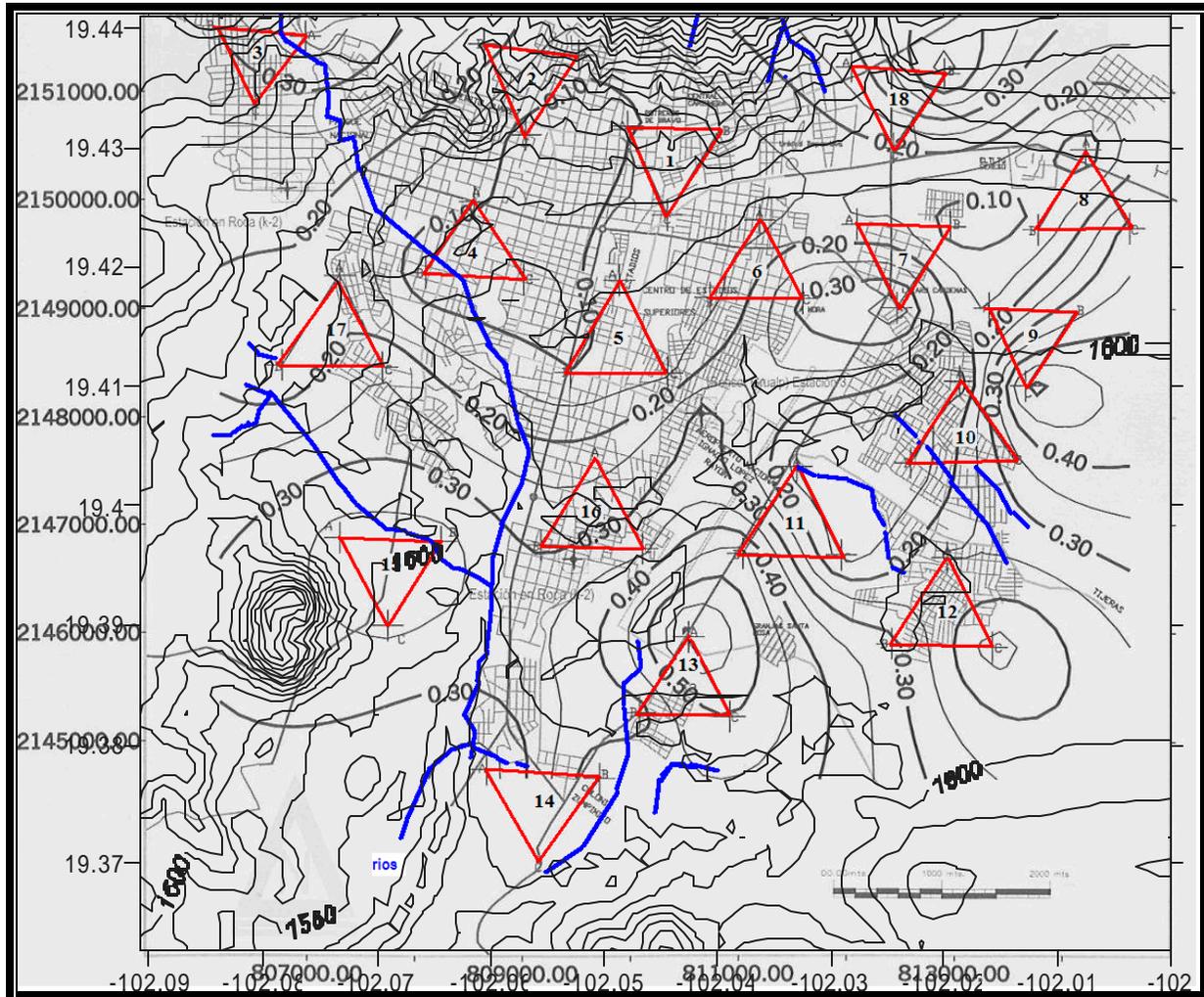


Figura 5. Mapa de isoperiodos de la ciudad de Uruapan Michoacán. Los contornos están dados en s, y las acotaciones de los ejes verticales y horizontales están en metros, muestra la topografía del lugar así como también los ríos que cruzan la ciudad (Vázquez Rosas, 2003).

En el presente estudio aplicaremos el método SPAC a los datos de microtremores (Utilizando las componentes verticales de los registros). Primero calculando la curva de dispersión de ondas Rayleigh y, a partir de ella, estimar un modelo de velocidades para cada arreglo. Después con la información de todos los arreglos, llegar ha obtener un modelo tridimensional.

III.2 Pre-Procesado del método SPAC:

Para iniciar con el pre-procesado de los microtremores se debe tener presente que estos tienen que tener el mismo tiempo de referencia (tiempo de inicio) así como también la duración de registro.

El pre-procesado del método se realiza en un programa en Fortran. Donde este calcula los espectros de potencia, la correlación cruzada y la obtención de los coeficientes de correlación. Realizando en el siguiente orden.

Lee los archivos que tienen el mismo tiempo de referencia con un encabezado.

Lee las ventanas de tiempo seleccionadas de (81.92 s tiempo relacionado a la restricción de la FFT de 2^N).

Se calculan los espectros de potencia para cada ventana y cada estación.

Se calculan las correlaciones cruzadas de los tres registros para cada ventana seleccionada.

Se calcula el promediado de los coeficientes de correlación.

Se calcula la curva velocidad de fase.

III.3 Procesado.

Por otro lado, en este caso de la ciudad de Uruapan Michoacán es importante hacer mención de cómo se consideró la dirección del análisis de las correlaciones cruzadas. Ya que se realizó una pequeña modificación para este tamaño de arreglos realizados en esta ciudad.

Esto es debido a que la abertura de los arreglos, es grande (de 950 m a 1 Km) y solo se lograron obtener buenas correlaciones en pocos arreglos (Vázquez R., Ricardo *et. al* 2005) considerando la dirección del cálculo entre los 3 vértices como se describe en la 2 parte en el punto IX de este trabajo.

Una de las aplicaciones del método SPAC, considera que la propagación de los microtremores es multi-direccional. Retomando esto, para el cálculo de las cross-correlaciones, se procede a calcular las correlación cruzada entre las dos estaciones y haciéndolo como se muestra en la figura 6. Tomando en cuenta que una de las estaciones se encuentra en el centro de un círculo y las otras dos a una distancia radial. Ahora si recordamos que Aki (1957) calcula las correlaciones cruzadas entre dos estaciones teniendo un arreglo radial.

Para este caso tomamos el mismo principio haciendo que cada uno de los vértices se considere como el centro de un círculo. Ya que la distancia entre sus vértices es equidistante. Y se encuentran a una distancia radial conocida. Calculando así un promediado entre las dos estaciones restantes por ejemplo se calcula para AB y AC y se saca su promedio, lo mismo se hace BA y BC y por ultimo CB y CA. Como se replantea en la figura 6, lo que al hacer esta aplicación nos permitió obtener un mayor número de resultados entre los arreglos analizados.

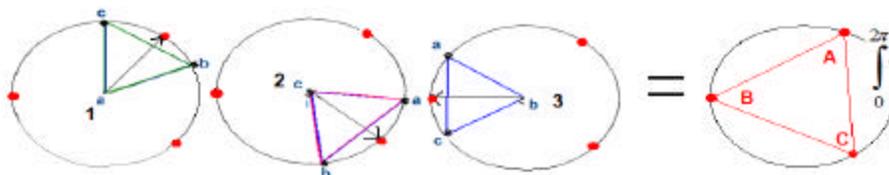


Figura 6. muestra la dirección de las correlaciones cruzadas utilizadas dentro del método SPAC para el caso de la ciudad de Uruapan Michoacán.

De esta manera se logró tener una menor incertidumbre en los resultados de las correlaciones, y en la determinación de la curva de dispersión. Una de las razones que dan mas certeza al análisis es por que se recalculan dos veces la correlación entre los tres vértices, lo que nos permite tener mayor control en la determinación de propagación, de las ondas de microtemores al propagarse dentro del arreglo.

De acuerdo con lo anterior, se procedió a la aplicación del método SPAC en 18 arreglos realizados en toda la ciudad. Con registros de 1800 s de grabación con arreglos instrumentales (tomándose a 100 muestras por s. lo que 30 min. equivalen a 18×10^4 muestras) quedando unos arreglos de 1km en algunos sitios, y en los demás sitios de 950 m distribuidos dentro de la mancha urbana.

A continuación se muestra la aplicación del método SPAC, para cada uno de los arreglos realizados en la ciudad de Uruapan. Iniciando con el arreglo 4.

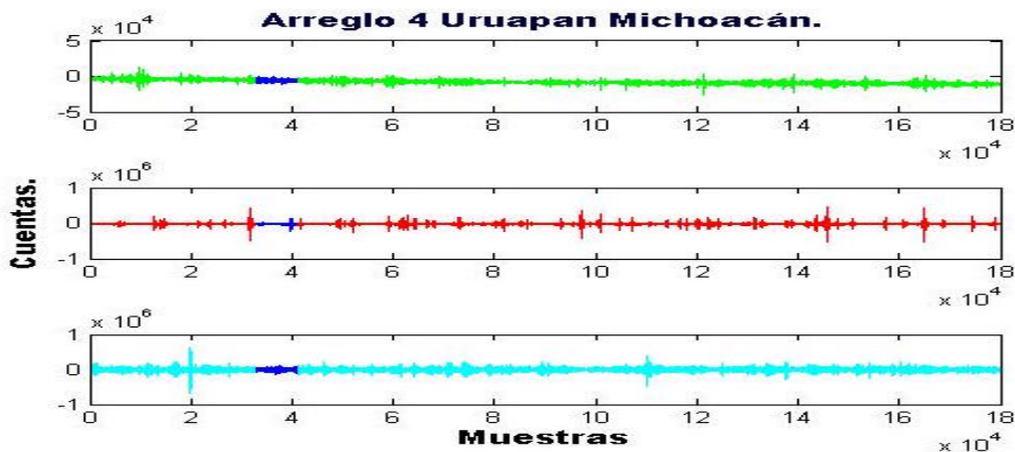


Figura 7. Muestra los registros de las componentes verticales del arreglo 4 con una duración de 30 minutos, mostrando con un segmento de una ventana de 81.92 segundos con color azul. Las unidades en el eje horizontal están en muestras y en el eje vertical están en cuentas.

Una vez que se tiene el mismo tiempo de referencia entre las tres señales se seleccionaron 21 ventanas de 81.92 s para después procesarlas, calculado los espectros de potencia para cada uno de los vértices (figuras 8, 9 y 10) y se utilizo un suavizado de 0.3 (con este suavizado solo tomara en cuenta valores mayores a 0.3 Hz. dentro del espectro de potencia).

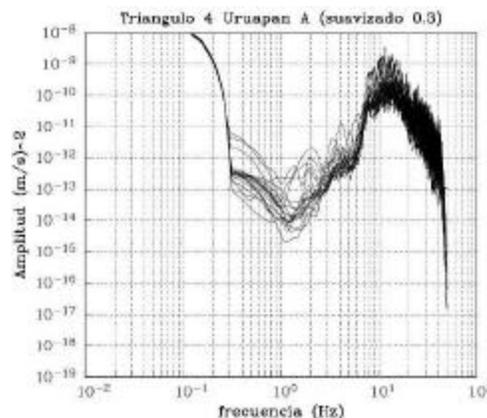


Figura 8. Espectro de potencia para el arreglo 4 mostrando los espectros para las 21 ventanas para el vértice A. en el eje horizontal tenemos valores de frecuencia Hz. y la amplitud en el eje vertical esta dada en $(m/s)^2$.

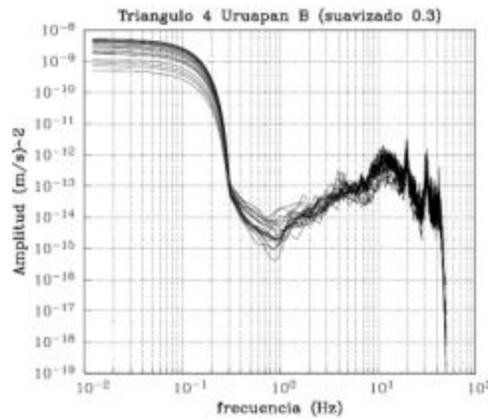


Figura 9. Espectro de potencia para el arreglo 4 mostrando los espectros para las 21 ventanas para el vértice B en el eje horizontal tenemos valores de frecuencia Hz. y la amplitud en el eje vertical esta dada en $(m/s)^2$.

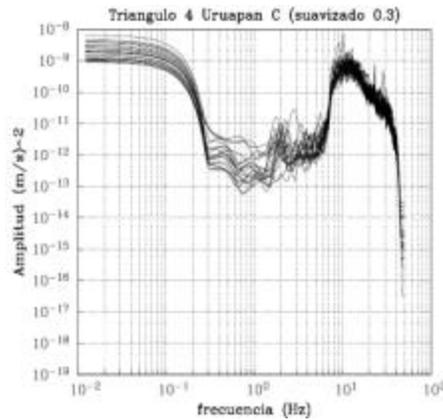


Figura 10. Espectro de potencia para el arreglo 4 mostrando los espectros para las 21 ventanas para el vértice C en el eje horizontal tenemos valores de frecuencia Hz. y la amplitud en el eje vertical esta dada en $(m/s)^2$.

Para cada una de las 21 ventanas se obtiene la correlación cruzada. Para el ejemplo que hemos tomado del arreglo 4 (de 950 m de abertura) las correlaciones cruzadas son mostradas en las figura 11 y 12. En cada cuadro aparecen las correlaciones cruzadas normalizadas de los tres vértices (lo que corresponde a la parte que se encuentra dentro de la integral de la ecuación 4). Una vez, calculadas las correlaciones cruzadas, se seleccionaron todas aquellas que tuvieran el mismo cruce por cero en la misma frecuencia y que tuvieran la misma similitud entre ellas.

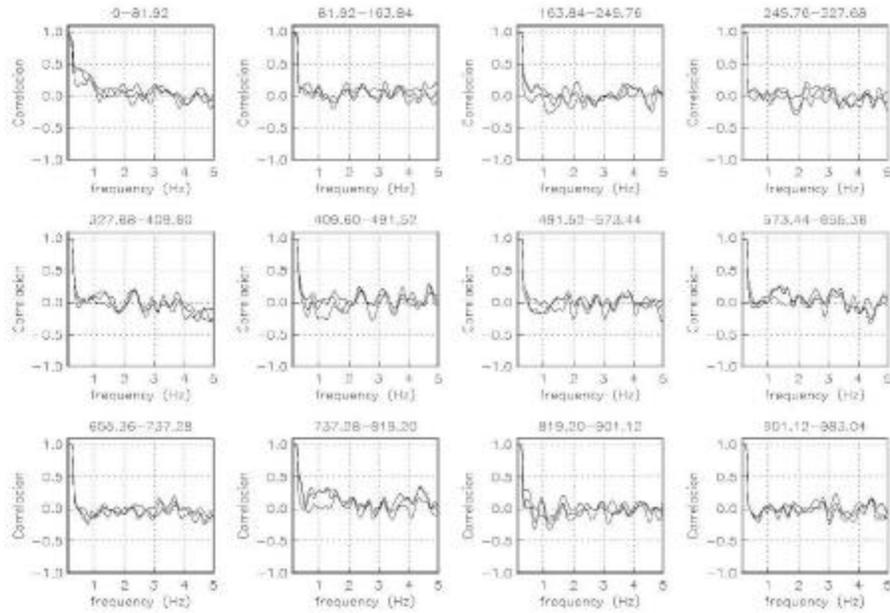


Figura 11. Correlaciones cruzadas para el arreglo 4, calculadas entre las tres estaciones para las 12 ventanas de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

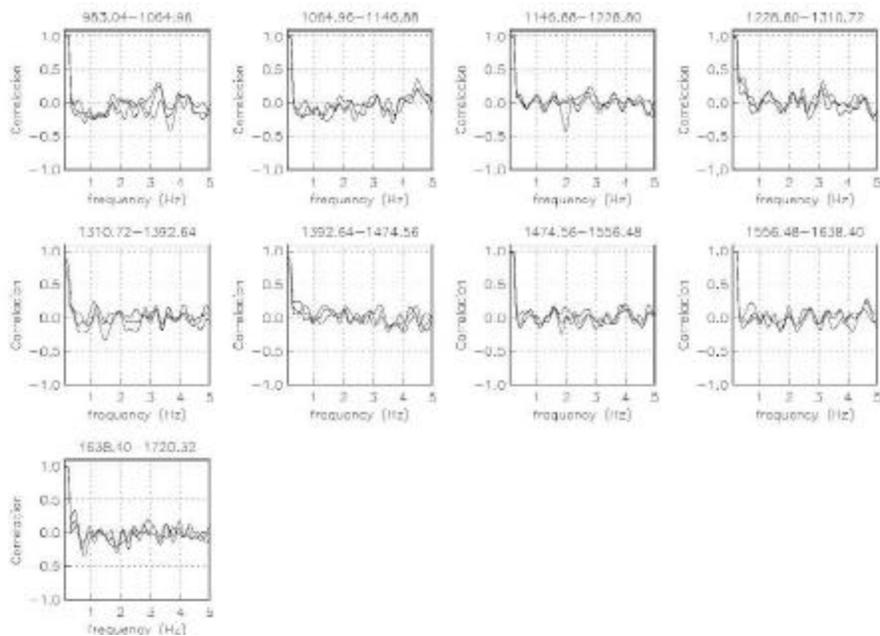


Figura 12. Correlaciones cruzadas para el arreglo 4 calculadas entre las tres estaciones para las 9 ventanas restantes de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

Después de calcular las funciones de correlación cruzada se seleccionaron todos aquellos que más se parecieran a una función Bessel de orden cero y que su cruce por cero estuviera en la misma frecuencia. Seleccionando todas aquellas con mejor similitud. Una vez realizado esto, se procede a calcular el coeficiente de auto-correlación para cada arreglo considerando los tres vértices, del cual para el presente trabajo se muestra para el arreglo 4 con 8 ventanas seleccionadas en la figura 13.

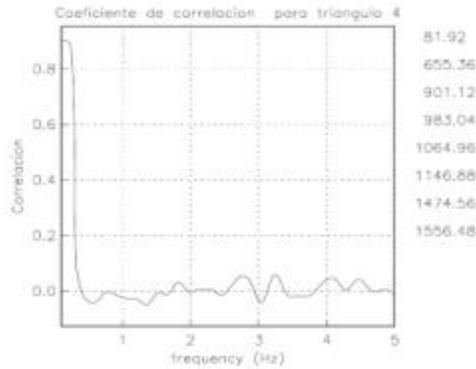


Figura 13. Coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo 4 mostrando en la parte derecha de la figura las ventanas seleccionadas que se utilizaron para este arreglo.

Una vez calculado el coeficiente de auto-correlación, se calculó la curva de dispersión como se muestra en la figura 14. En esta figura solo se grafican las secciones de curvas comprendidas entre líneas rectas que delimitan el abanico de confiabilidad según lo definió Miyakoshi (1995).

Una vez calculado el coeficiente de auto-correlación, se calculó la curva de dispersión con su desviación estándar como se muestra en la figura 14. En esta figura solo se grafican las secciones de curvas comprendidas entre líneas rectas que delimitan el abanico de confiabilidad según lo definió Miyakoshi (1995). El criterio que se toma en cuenta para el ajuste de la curva de dispersión es el cruce por cero del coeficiente de correlación y el rango de frecuencias que se encuentra dentro del rango del abanico de confiabilidad.

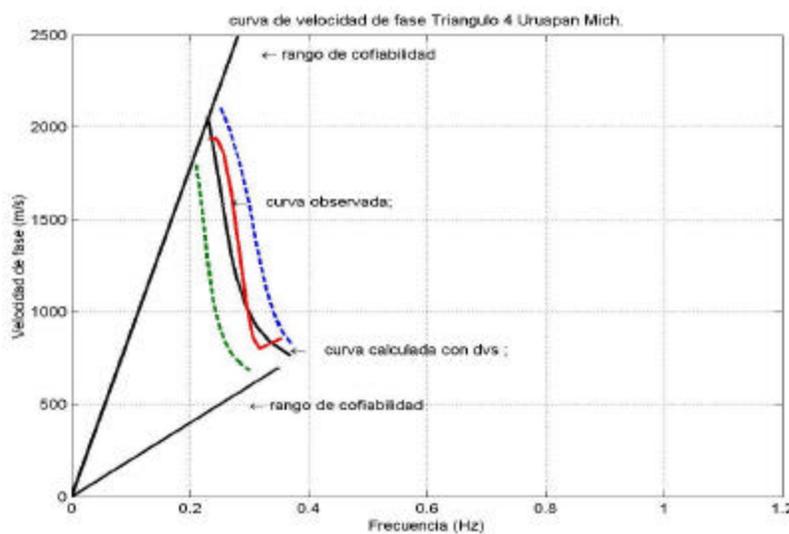


Figura 14. Curva de dispersión observada para los tres vértices ABC (línea continua roja) y la curva calculada (línea continua negra), la desviación estándar (líneas punteadas), y su abanico de confiabilidad propuesto por Miyakoshi (1995).

En la tabla 1 se muestra el modelo promedio calculado y su desviación estándar obtenido para este arreglo 4.

Espesor (H)	Densidad (d)	Velocidad O. S (Vs)	Velocidad O. P (Vp)
Promedio			
600	1.6	850.0	900.0
0.0	1.8	2740	4050
Mas DVS			
550	1.6	890.0	1030.0
0.0	1.8	3300.0	4600.0
Menos DVS			
710	1.6	750.0	900.0
0	1.8	3300.0	4600.0

Tabla 1. Resultados de los modelos obtenidos para el ajuste de la curva de dispersión considerando la desviación estándar para una capa más el semi-espacio (el espesor del Semi-espacio se considera infinito).

Miyakoshi en su tesis doctoral (1995) define el abanico de confiabilidad para la curva de dispersión que se obtiene con el método SPAC como se muestra en la figura 14, considerando la distancia r entre estaciones y la frecuencia y estas están dadas por las siguientes expresiones.

$$C \text{ máx.} = r \times 10 \times f \quad (16).$$

$$C \text{ min.} = r \times 2 \times f \quad (17).$$

Estas expresiones se utilizaron en todos los arreglos. El desarrollo de análisis mostrado para el arreglo 4 se aplicó a los 18 arreglo, para los cuales se obtuvo resultados sólo para 8 arreglos (1,2,4,5,8,9,12,14). También se obtuvo resultados solo para cuatro arreglos en los que solo se logró estimar un punto dentro de la curva de dispersión (arreglos 3, 10, 15,17). Los otros sitios que no se pudieron estimar, fue por la falta de correlación entre sus estaciones, lo que nos provoco no obtener datos para obtener la curva de velocidad de fase. Esto lo atribuimos a las condiciones físicas del lugar como y a su topografía.

En los siguientes arreglos solo se muestran los resultados obtenidos, en el apéndice aparecen las graficas obtenidas para toda la señal sin hacer la discriminación de los datos buenos para las 21 ventanas (espectros de potencia y correlaciones cruzadas).

III.3.1 Triángulo 1, Uruapan Michoacán.

En la figura 15 muestra los espectros de potencia de las dos ventanas de correlación cruzada seleccionadas (327.68, 409.60). Para nuestro análisis mostrando menor dispersión entre ellos relativamente hacia bajas frecuencias que es la zona de interés (de 0.3 Hz -2.0 Hz).

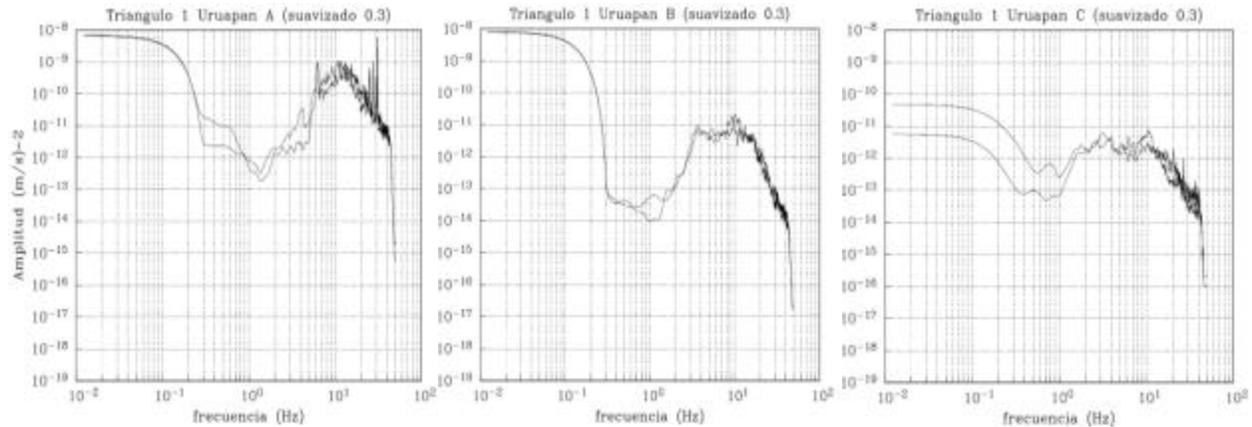


Figura 15. Espectros de potencia de las 2 ventanas de 81.92 s para los vértices A, B, C. mostrando el valor de las frecuencias Hz. en el eje horizontal y en el vertical muestra la amplitud en $(m/s)^2$.

En la figura 16 se muestran las ventanas seleccionadas de las correlaciones cruzadas de este arreglo. Las ventanas sobrantes se descartaron porque la correlación entre ellas era muy dispersa y su amplitud es muy baja.

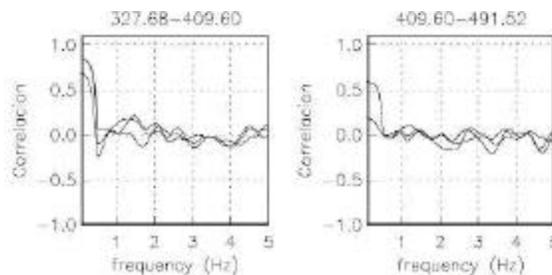


Figura 16 Correlaciones cruzadas para el arreglo 1, calculadas entre las tres estaciones para las 12 ventanas de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

Una vez seleccionadas las ventanas de las correlaciones cruzadas entre los tres vértices se calculó el coeficiente de auto-correlación de las tres estaciones como se muestra en la figura 17. Nótese que el primer cruce por cero lo tenemos en el rango de bajas frecuencias alrededor de 0.4 Hz lo que nos permitirá obtener una profundidad de exploración no tan superficial.

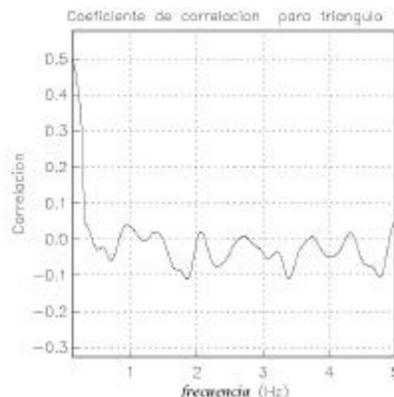


Figura 17. Coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo 1 para las ventanas seleccionadas.

Una vez calculado el coeficiente de auto-correlación, se calculó la curva de dispersión como se muestra en la figura 18. La curva de dispersión es calculada con un modelo de una capa y un semi-espacio. El modelo correspondiente aparece en la esquina inferior derecha de la figura. La curva de dispersión observada solo es válida en un intervalo limitado de frecuencias alrededor de 0.25 Hz y 0.3 Hz a pesar de ser un rango pequeño la información que nos da es de bastante utilidad, tomando en consideración que la velocidades de los esfuerzos laterales no tienen mucha variación con respecto a los sitios cercanos, lo que solo tendremos variaciones en el espesor y podremos hacer estimación de la capa resonante.

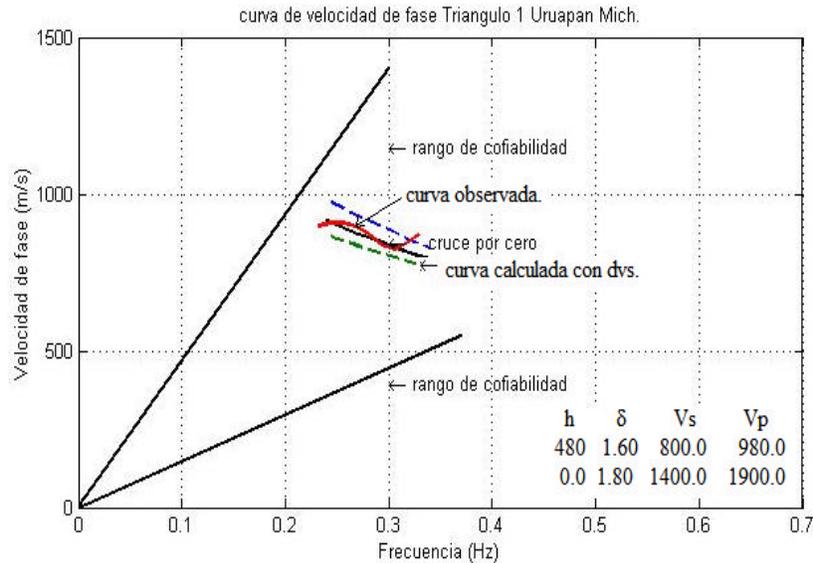


Figura 18. Muestra el promedio de la curva de dispersión calculada con línea continua negra con su desviación estándar líneas punteadas, la curva observada con línea continua roja, mostrando así el cruce por cero obtenido a partir de un punto del coeficiente de correlación, mostrando también con línea continua el abanico de confiabilidad de Miyakoshi (1995).

III.3.2 Triángulo 2, Uruapan Michoacán.

En la figura 19 observamos los espectros de potencia de las 2 ventanas que se utilizaron para nuestro análisis de este arreglo.

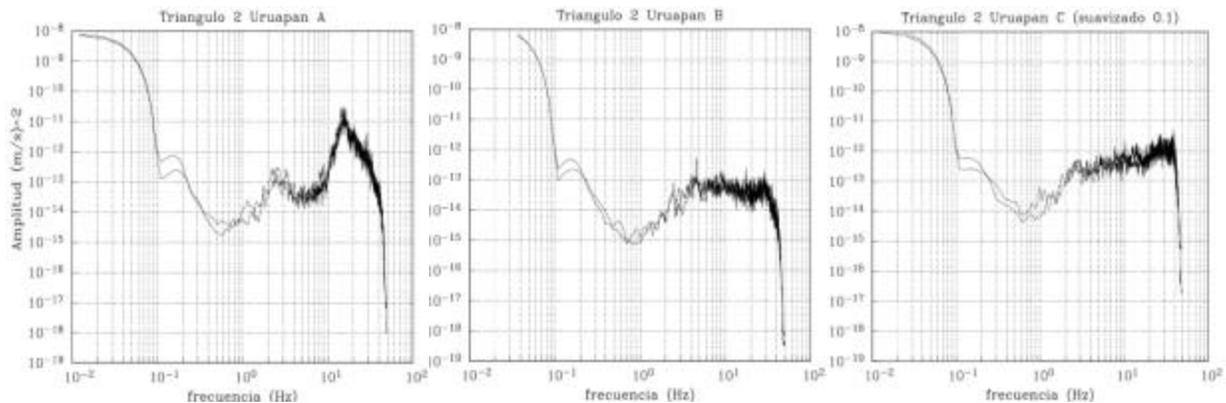


Figura 19. Espectros de potencia de las 2 ventanas seleccionadas de 81.92 s para los vértices A, B, C. mostrando el valor de las frecuencias Hz en el eje horizontal y en el vertical muestra la amplitud en $(m/s)^2$.

En la figura 19 se observan los espectros de potencia para las 2 ventanas seleccionadas de los tres vértices mostrando poca dispersión hacia bajas frecuencias lo que es favorable para obtener una mejor definición del coeficiente de correlación.

En este sitio se consideraron dos correlaciones cruzadas como se muestra en la figura 20 y de eliminaron 19 correlaciones por que presentaron dispersión entre ellas y su cruce por cero no era concordante entre ellas.

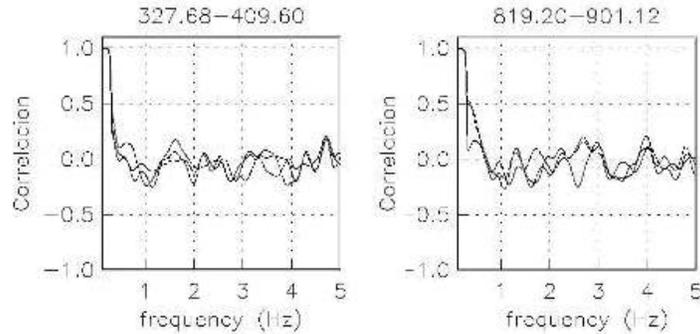


Figura 20. Correlaciones cruzadas para el arreglo 2, calculadas entre las tres estaciones para las 9 ventanas restantes de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

Una vez seleccionadas las ventanas de las correlaciones cruzadas entre los tres vértices se calcula el coeficiente de correlación de las tres estaciones como se muestra en la figura 21, haciendo el promedio azimutal como se indico en la sección 1.2. Para este caso se seleccionaron dos ventanas únicamente, debido a que el cruce por cero lo tenemos alrededor de 0.37 Hz. Y solo en este rango cumplían, y las ventanas restantes muestran dispersión entre ellas. Dando su cruce por cero por arriba de 1 Hz. Para nuestro caso en particular las frecuencias las delimito el coeficiente de auto-correlación, que se encuentra alrededor de 0.37 Hz. Es por ello que se consideraron solo dos ventanas para este análisis.

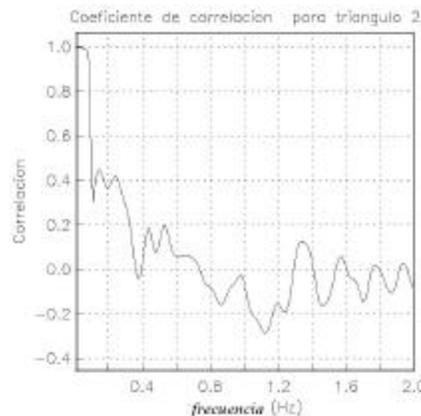


Figura 21. Coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo 2 para las ventanas seleccionadas (327.68, 819.20).

Una vez calculado el coeficiente de auto-correlación, se calculó la curva de dispersión hacia bajas frecuencias (en el rango de 0.2 y 0.4 Hz) como se ilustra en la figura 22. Para este arreglo se muestra la curva de dispersión calculada, válida en el rango de frecuencias de 0.3Hz – 0.4Hz. Esta curva se calculó utilizando un modelo de una capa y un semi-especio, como se muestra en la parte inferior derecha de la figura 22.

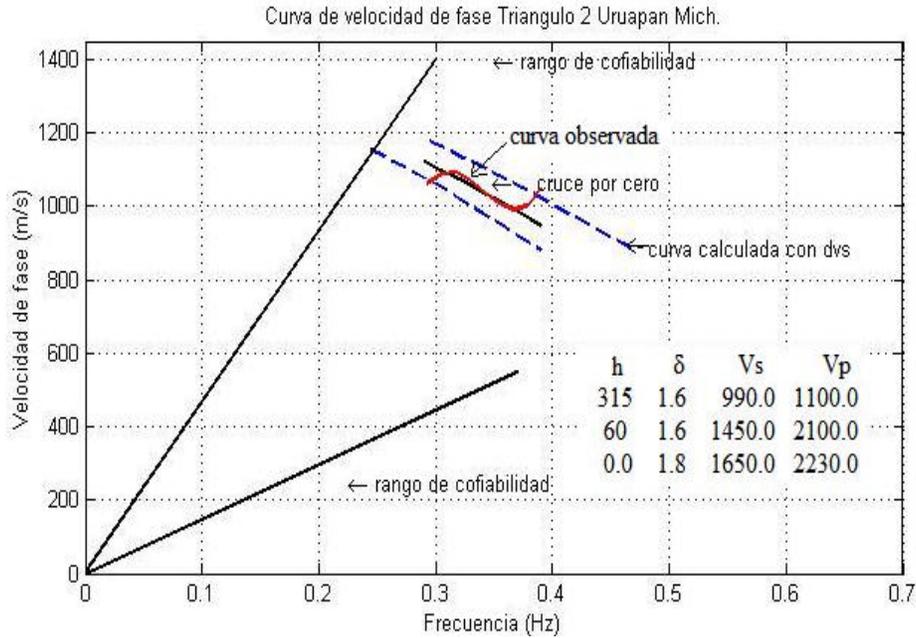


Figura 22. Muestra el promedio de la curva de dispersión calculada con línea continua negra con su desviación estándar líneas punteadas, la curva observada con línea continua roja, mostrando así el cruce por cero obtenido a partir de un punto del coeficiente de correlación, mostrando también con línea continua el abanico de confiabilidad de Miyakoshi (1995).

III.3.3 Triángulo 5, Uruapan Michoacán.

Este arreglo 5 es de 1km de distancia entre sus vértices. Como primera parte se ilustran los espectros de potencia calculados para 1 ventana seleccionada de 81.92s (ver figura 23).

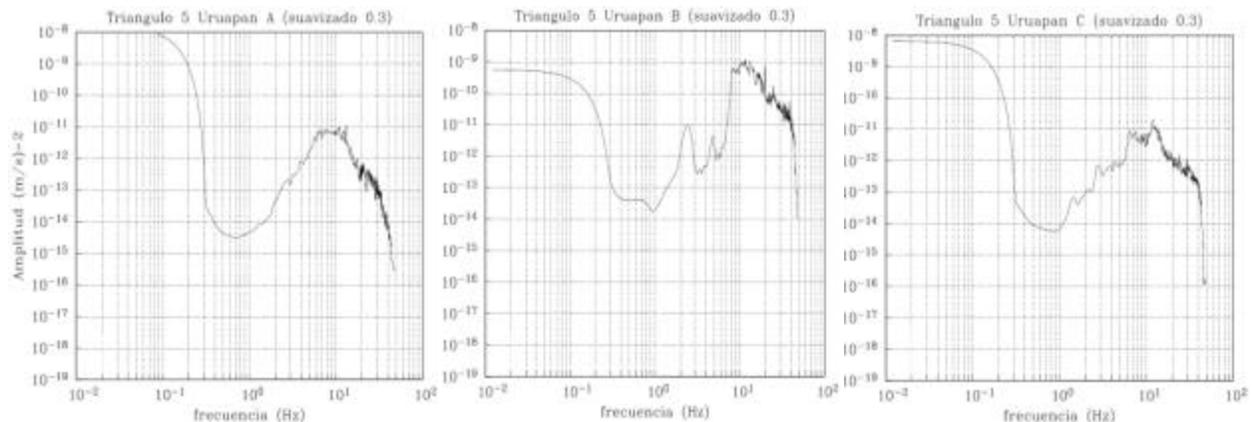


Figura 23. Espectro de potencia de una ventana seleccionada de 81.92 s para los vértices A, B, C. mostrando el valor de las frecuencias Hz. en el eje horizontal y en el vertical muestra la amplitud en $(m/s)^2$.

De los tres vértices se seleccionó una sola ventana de las 21 ventanas calculadas, esto se realizó por que los resultados de las correlaciones cruzadas para este arreglo no presentaron buenas correlaciones, la mayoría de las correlaciones tiene dispersión entre las tres estaciones. Esto a consecuencia de la dispersión entre los espectros de potencia de cada vértice como se mostró en la figura 23 debido a las fuentes cercanas a los vértices.

Para este caso, en especial se tomó solamente la primera ventana debido ya que las correlaciones cruzadas no son buenas en su mayoría y lo que se pretende es que estas tengan la forma de la función Bessel de orden cero, con un valor máximo en la ordenada de 1. Esto sería para el caso ideal. Por otro lado es importante aclarar que se despreciaron los valores de inicio, hasta antes del valor máximo de la correlación cruzada. Esto nos permitió obtener un buen coeficiente de correlación, ya que para el rango de frecuencias que se está trabajando es a partir de 0.3 Hz y los valores desechados son menores a 0.3 Hz. la figura 24 muestra la ventana de la correlación cruzada seleccionada.

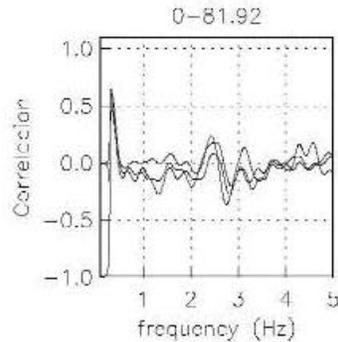


Figura 24. Correlación cruzada para el arreglo 5, calculada entre las tres estaciones para la ventana de 81.92 s indicando el tiempo de inicio en la parte superior.

Una vez seleccionada la ventana de correlaciones cruzadas entre los tres vértices se calcula el coeficiente de auto-correlación de las tres estaciones como se muestra en la figura 25.

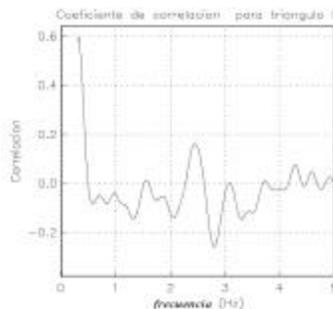


Figura 25. Coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo 5 para la ventana seleccionada (0.00).

Una vez calculado el coeficiente de auto-correlación, se calculó la curva de dispersión en el rango de frecuencias bajas de 0.2 – 0.8 Hz. Este rango nos permite obtener una profundidad de exploración relativamente grande como se muestra en la figura 26. La curva de dispersión calculada se encuentra del rango de confiabilidad entre las frecuencias de 0.3 Hz – 0.6 Hz. La cual se obtuvo a partir de un modelo de una capa, y un semi-espacio, como se muestra en la parte inferior derecha de la figura 26.

En este caso cabe recordar que el modelo se considero a partir de los arreglos cercano a este sitio, por otro lado el tener una duración considerable de grabación desde una venta hasta varias para realizar el análisis.

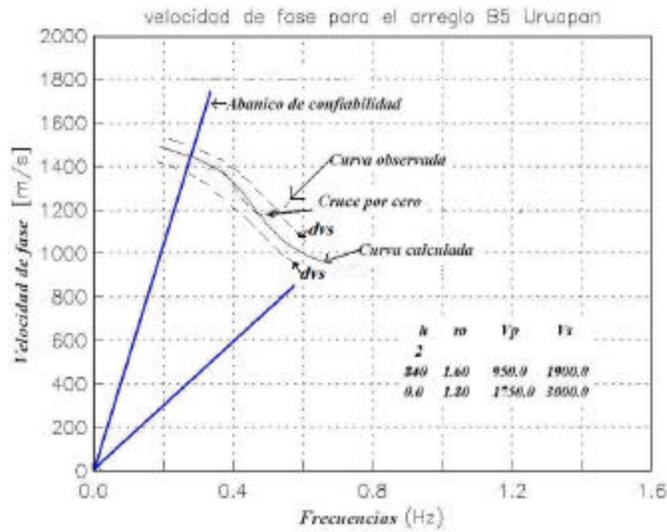


Figura 26. Curva de dispersión observada (línea punteada) y calculada (línea continua) mas su desviación estándar con línea punteada, mostrando así el cruce por cero, se muestra también con líneas rectas que parten de cero, el abanico de confiabilidad de Miyakoshi (1995).

En el análisis de la curva de dispersión se consideraron los modelos promedios obtenidos en los sitios cercanos a este arreglo. Ya que en este sitio solo obtuvo una sola correlación, lo que para su cálculo de la desviación estándar no fue suficiente, se considero un promedio de la desviación estándar de los sitios cercanos.

III.3.4 Triangulo 8, Uruapan Michoacán.

Para este arreglo la distancia entre sus vértices es de 1 km de distancia. Como primera parte se observan los espectros de potencia calculados para las 2 ventanas seleccionadas para este arreglo ver figura 27.

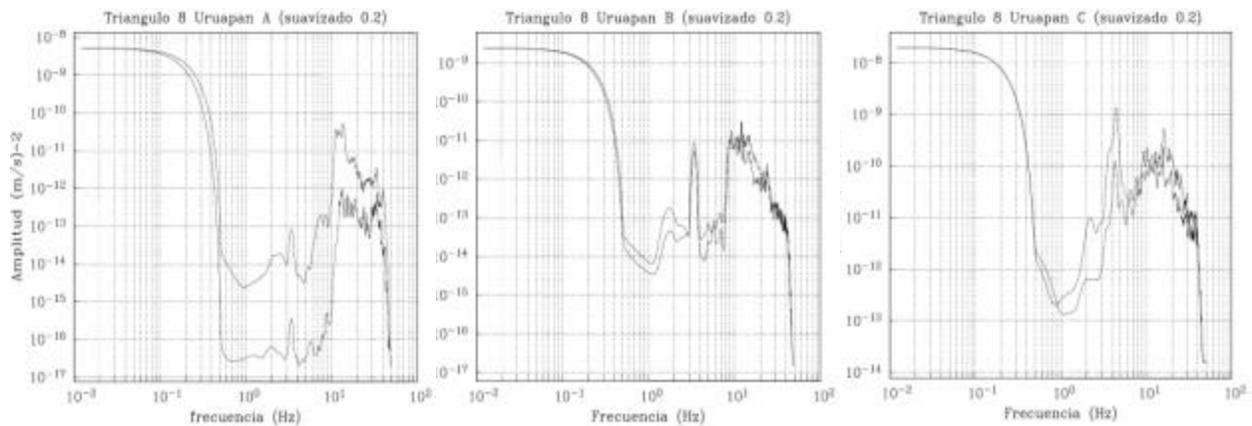


Figura 27. Espectros de potencia de las 2 ventanas seleccionadas de 81.92s para los vértices A, B, C. mostrando el valor de las frecuencias Hz. en el eje horizontal y en el vertical muestra la amplitud en (m/s)².

Este sitio se encuentra en la parte NE de la ciudad de Uruapan (ver figura 5). En este arreglo había mucho ruido cultural en el vértice A, y en los vértices B y C se encontraban en zonas de menor ruido.

Obtenidos los espectros se calcularon las 2 correlaciones cruzadas de las ventanas seleccionadas (81.92 y 327.68) en el arreglo 8 de Uruapan Michoacán, como se muestran en la figuras 28. discriminado todas aquellas que tuvieron mala correlación entre los tres vértices y su cruce por cero no coincidía con mismo rango de frecuencias.

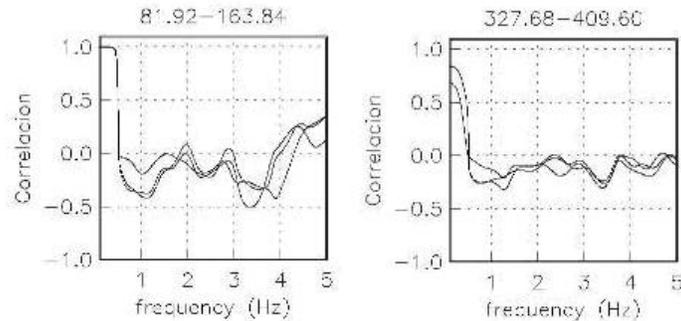


Figura 28. Correlaciones cruzadas para el arreglo 8, calculadas entre las tres estaciones para las 9 ventanas restantes de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

Para este sitio se seleccionaron dos ventanas seleccionadas (la 81.92 y 327.60). De las correlaciones cruzadas entre los tres vértices, ya que el resto de las correlaciones cruzadas no tiene buena similitud entre ellas y también muestran dispersión entre ellas. Partiendo de las correlaciones cruzadas seleccionadas se calculó el coeficiente de auto-correlación de las tres estaciones como se ilustra en la figura 29.

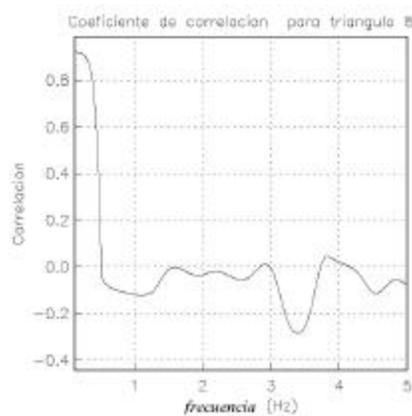


Figura 29 Coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo 8 para las 2 ventanas seleccionadas.

Una vez calculado el coeficiente de auto-correlación y definido el primer cruce por cero, se calculó la curva de dispersión entre el rango de frecuencias de 0.2 y 0.8 Hz. Dando un ajuste claramente en la curva de dispersión calculada, con respecto a la observada dentro del rango del abanico de confiabilidad alrededor de 0.4 Hz a 0.6 Hz como se muestra en la figura 30. Este ajuste obtuvo utilizando un modelo de una capa y un semi-espacio (ver figura parte superior derecha).

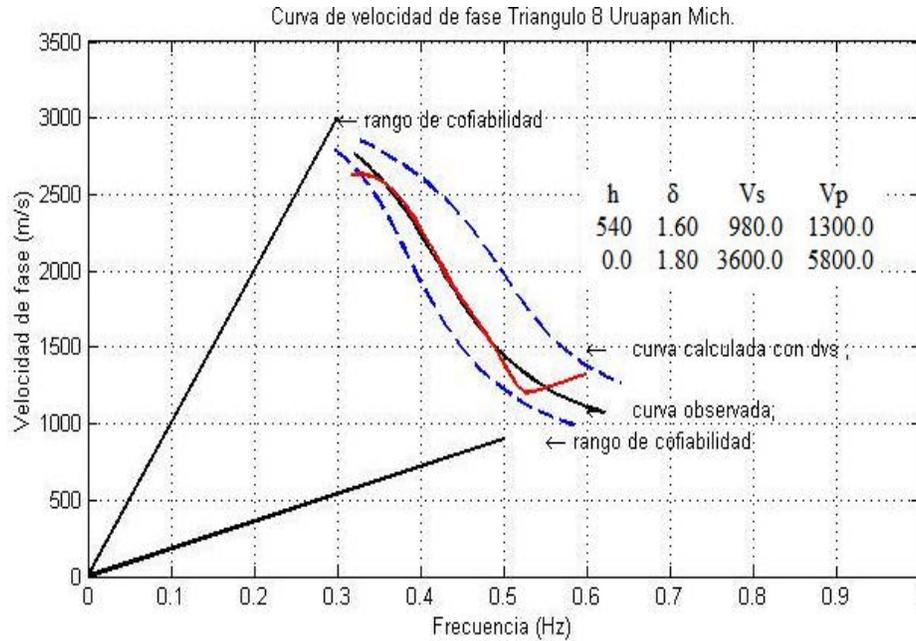


Figura 30. Muestra el promedio de la curva de dispersión calculada con línea continua negra con su desviación estándar líneas punteadas, la curva observada con línea continua roja y muestra también con líneas rectas que parten de cero, el abanico de confiabilidad de Miyakoshi (1995).

III. 3.5 Triangulo 9 Uruapan Michoacán.

Para este arreglo la distancia entre sus vértices es de 950 m de distancia. En este arreglo se obtuvieron los espectros de potencia calculados para las ventanas seleccionadas ver figura 31.

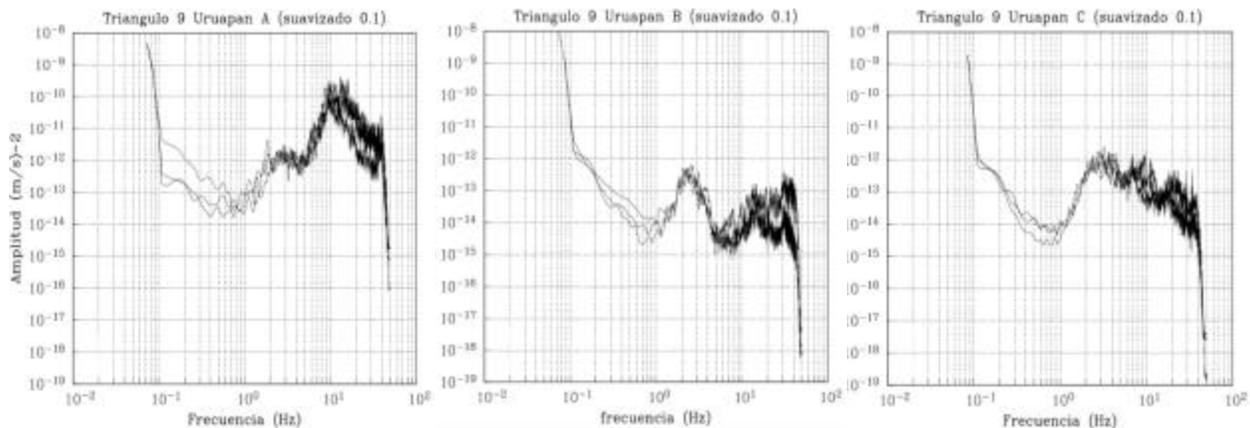


Figura 31. Espectros de potencia de las 2 ventanas seleccionadas de 81.92 s para los vértices A, B, C. mostrando el valor de las frecuencias Hz. en el eje horizontal y en el vertical muestra la amplitud en (m/s)².

Por consiguiente se calcularon las correlaciones cruzadas de 81.92 s en el arreglo 9 de Uruapan Michoacán. Seleccionando todas aquellas que tenían mejor similitud entre ellas y que su cruce por cero esta en el mismo rango de frecuencias como se ilustra en la figura 32.

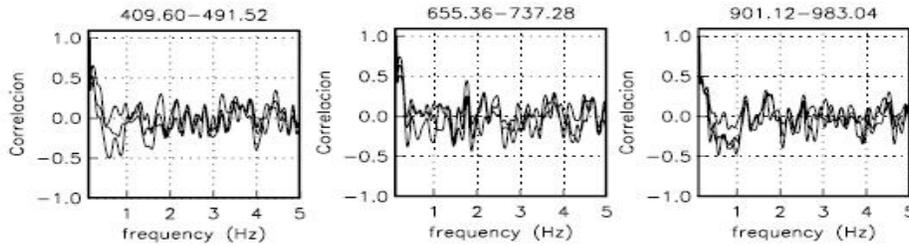


Figura 32. Correlaciones cruzadas para el arreglo 9, calculadas entre las tres estaciones para las 3 ventanas de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

Con estas ventanas de correlaciones cruzadas se calculó el coeficiente de corrección mostrando este un cruce por cero alrededor de 0.2 hz como se muestra en la figura 33.

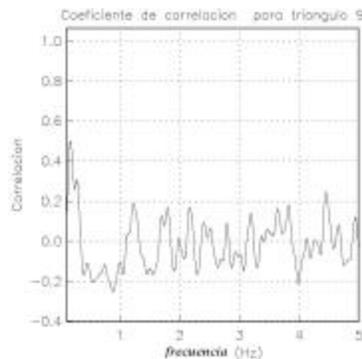


Figura 33. Coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo 8 para las ventanas seleccionadas (409.60, 655.36, 901.12).

Una vez calculado el coeficiente de auto-correlación y considerando el primer cruce por cero alrededor de 0.3 Hz, se calculó la curva de dispersión como se observa en la figura 34 en el rango de frecuencias bajas alrededor de 0.3 y 0.37 Hz utilizando un modelo de una capa y un semi-espacio.

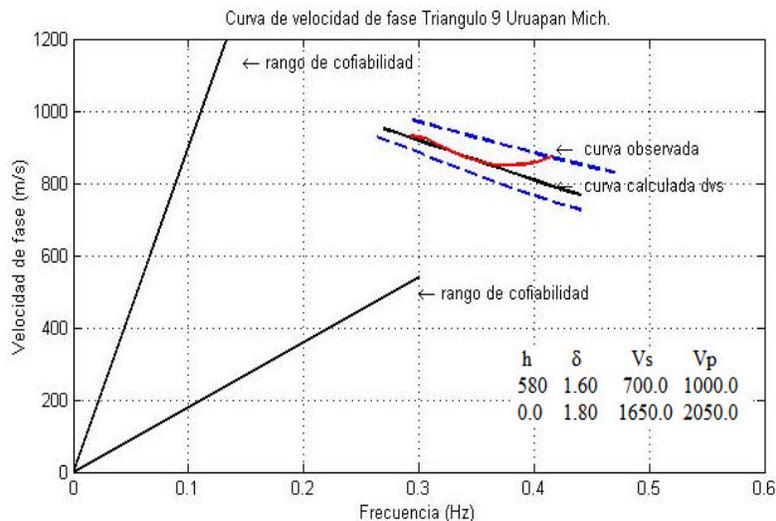


Figura 34. Muestra el promedio de la curva de dispersión calculada con línea continua negra con su desviación estándar líneas punteadas, la curva observada con línea continua roja y muestra también con líneas rectas que parten de cero, el abanico de confiabilidad de Miyakoshi (1995).

III. 3. 6 Triangulo 12 Uruapan Michoacán.

Para este arreglo la distancia entre sus vértices es de 1km de distancia. Como primera parte se observan los espectros de potencia calculados para las seleccionadas para este arreglo ver figura 35.

En este arreglo se observa que en el vértice A, los espectros de potencia tienen buena similitud entre las 2 ventanas mostrándose estables hacia frecuencias bajas. Por otro lado se ve que los vértices B y C, tienen poca dispersión en frecuencias bajas, debido a las fuentes locales en cada vértice.

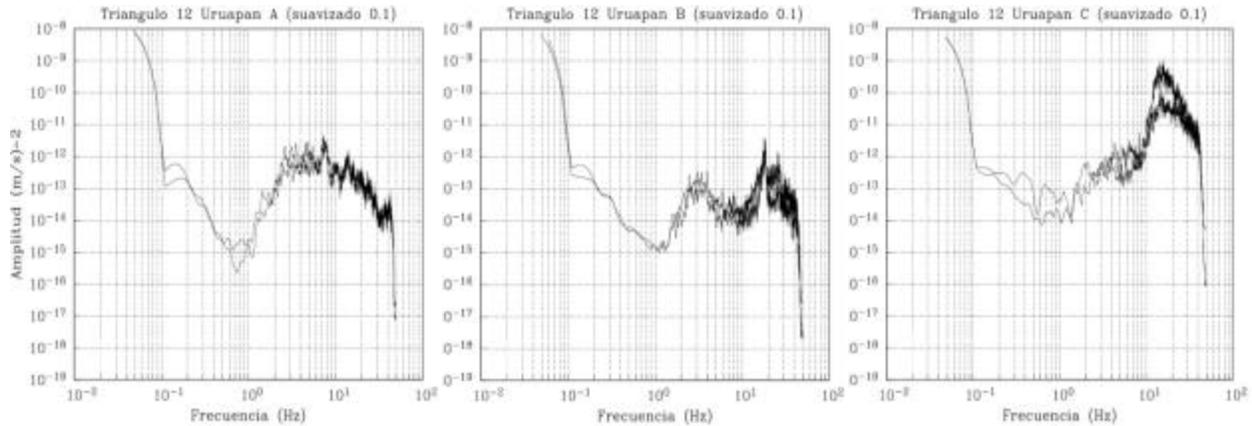


Figura 35. Espectros de potencia de las 2 ventanas seleccionadas de 81.92s para los vértices A, B, C. mostrando el valor de las frecuencias Hz. en el eje horizontal y en el vertical se muestra la amplitud en $(m/s)^2$.

En la figura 36 se ilustran las correlaciones cruzadas del arreglo 12 de Uruapan Michoacán, con 2 ventanas de 81.92 s.

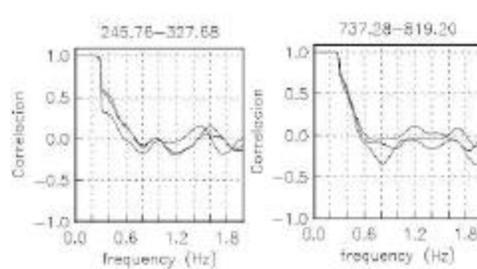


Figura36. Correlaciones cruzadas para el arreglo12, calculadas entre las tres estaciones para las 2 ventanas de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

Una vez seleccionadas las ventanas de las correlaciones cruzadas entre los tres vértices se calcula el coeficiente de auto-correlación de las tres estaciones como se presenta en la figura 37.

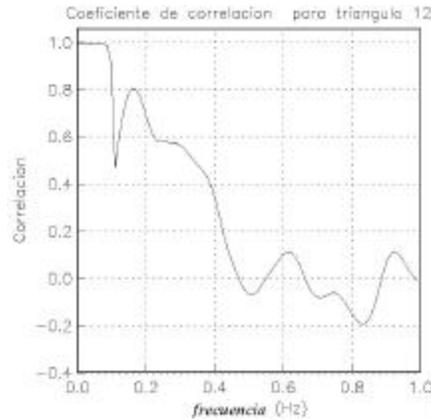


Figura 37. Coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo 12 para las ventanas seleccionadas.

Una vez calculado el coeficiente de auto-correlación y considerando el primer cruce por cero alrededor de 0.45 Hz., se calculó la curva de dispersión como se ilustra en la figura 38 considerando un modelo de una capa y un semi-especio.

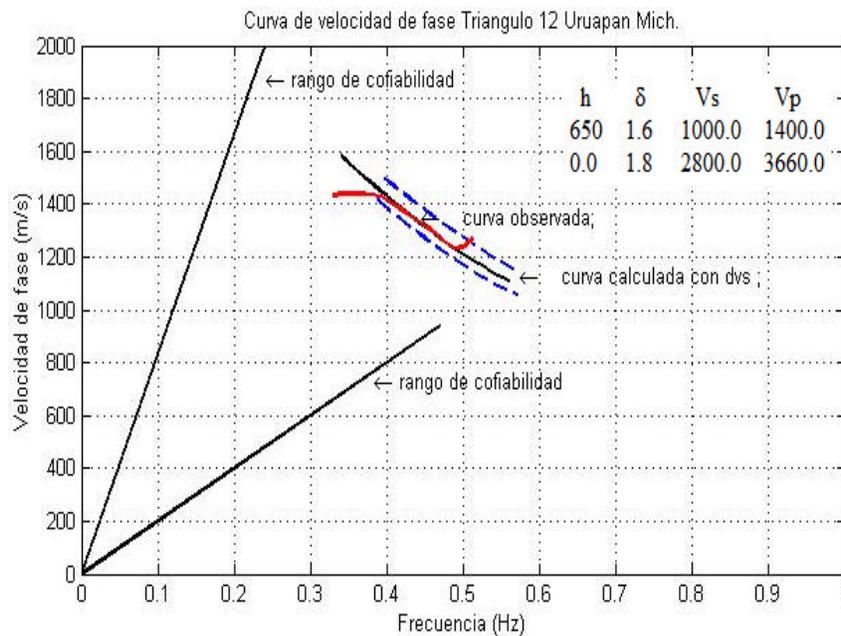


Figura 39. Muestra el promedio de la curva de dispersión calculada con línea continua negra con su desviación estándar líneas punteadas, la curva observada con línea continua roja y se muestra también con líneas rectas que parten de cero, el abanico de confiabilidad de Miyakoshi (1995).

III.3.6 Triángulo 14 Uruapan Michoacán.

Este arreglo tiene una distancia entre sus vértices de 1km. La figura 40 muestra los espectros de potencia calculados para las ventanas seleccionadas para este arreglo.

Para este arreglo las ventanas seleccionadas muestran en sus espectros poca dispersión. El vértice B se presenta más estable que el vértice A, mientras que el C se observa más dispersión.

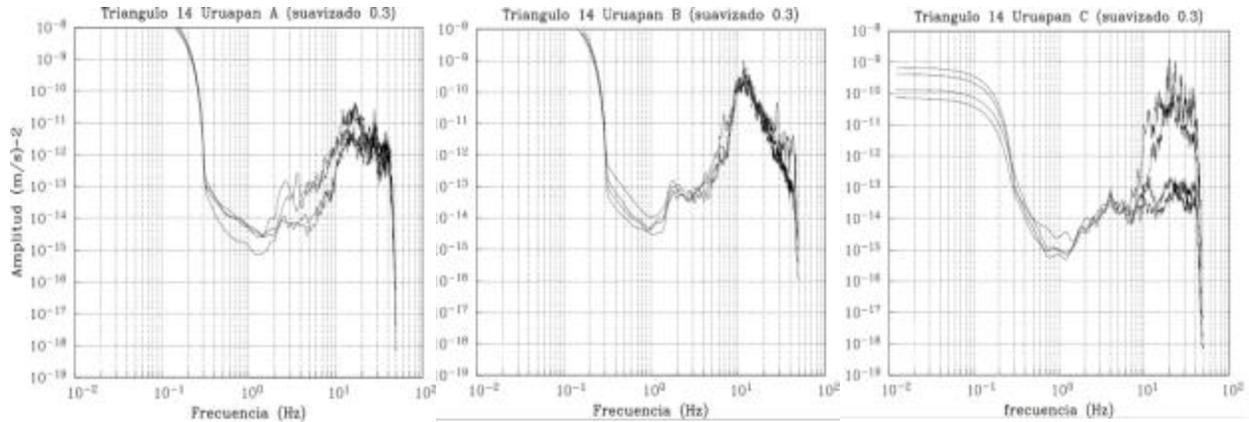


Figura 40. Espectros de potencia de las 4 ventanas seleccionadas de 81.92 s para los vértices A, B, C, mostrando el valor de las frecuencias Hz. en el eje horizontal y en el vertical muestra la amplitud en (m/s)².

En la siguiente figura se muestran las correlaciones cruzadas calculadas para el arreglo 14 de Uruapan Michoacán, con 4 ventanas de 81.92 s como se ilustra en la figura 41.

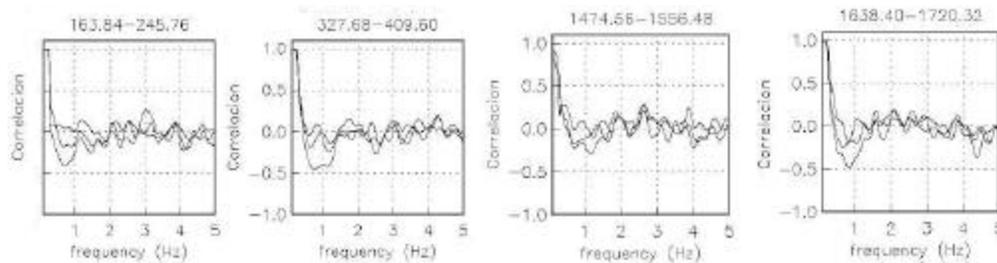


Figura 41. Correlaciones cruzadas para el arreglo 14, calculadas entre las tres estaciones para las 4 ventanas restantes de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

Una vez seleccionadas las ventanas que mejor similitud presentaron y que su cruce por cero corresponde a la misma frecuencia de las cross-correlaciones, se calcula el coeficiente de auto-correlación como se ilustra en la figura 42.

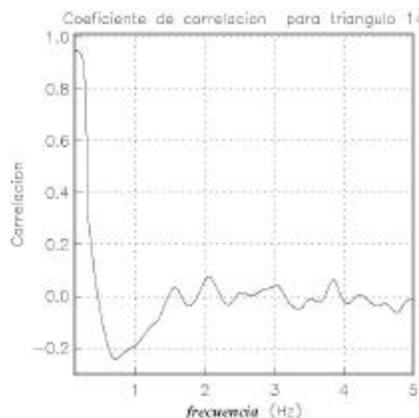


Figura 42. Ejemplo del coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo 14 para las ventanas seleccionadas (163.84, 327.68, 1474.56, 1638.40).

Una vez calculado el coeficiente de auto-correlación y estimado el cruce por cero, se calculó la curva de dispersión como se muestra en la figura 43. Utilizando un modelo de una capa y un semi-espacio.

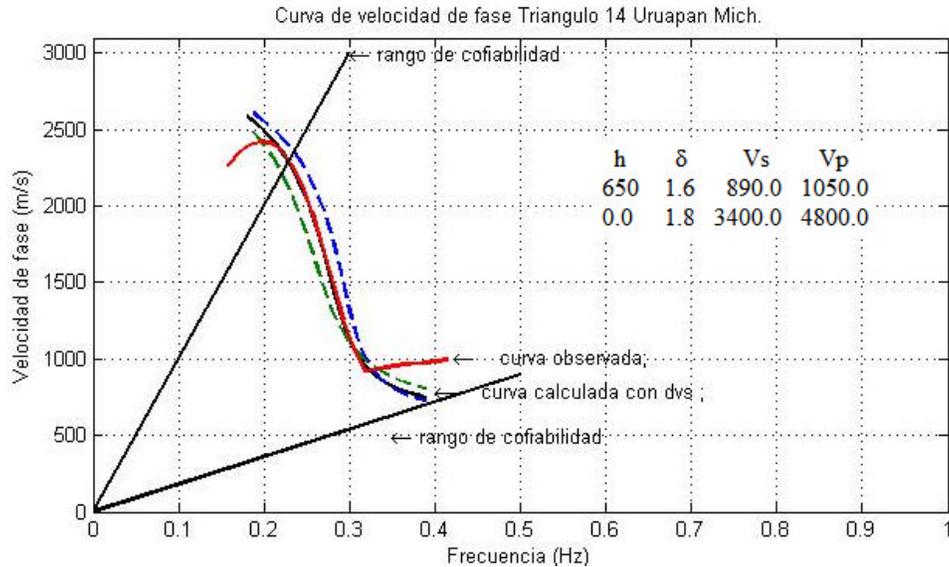


Figura 43. Muestra el promedio de la curva de dispersión calculada con línea continua negra con su desviación estándar líneas punteadas, la curva observada con línea continua roja y se muestra también con líneas rectas que parten de cero, el abanico de confiabilidad de Miyakoshi (1995).

Para los siguientes arreglos, solo se pudo determinar un solo punto en la curva de dispersión. Debido a que la curva de velocidad de fase obtenida, no esta bien definida. Y solo se pudo determinar la curva de dispersión para un solo punto de la curva. Esto solo se pudo estimar por el cruce por cero del coeficiente de correlación. Esto solo se determino para los arreglos 3, 10, 15 y 17.

III. 3.8 Triángulo 3 Uruapan Michoacán.

Para este arreglo tiene una distancia entre sus vértices de 1 km. primero se grafican los espectros de potencia para las ventanas seleccionadas para este arreglo ver figura 44.

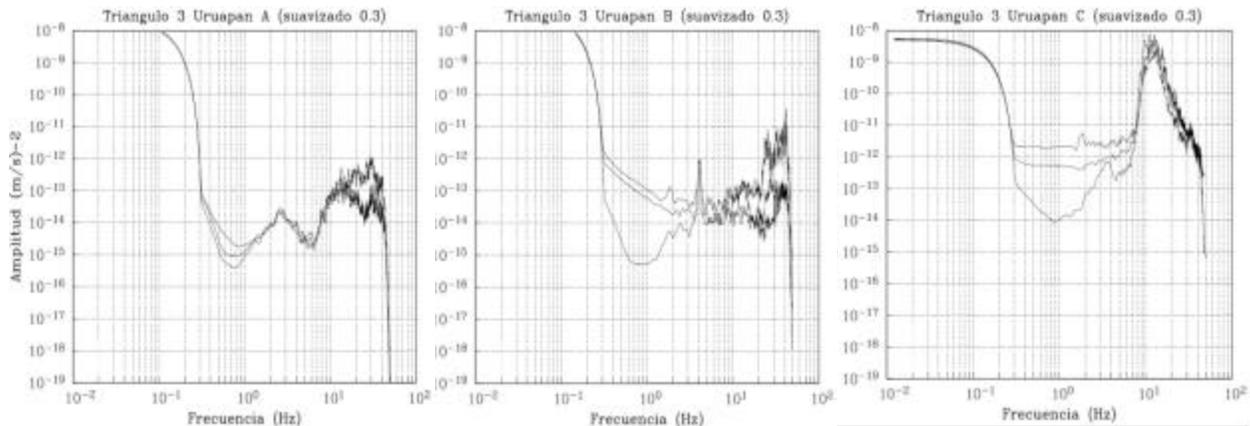


Figura 44. Espectros de potencia de las 4 ventanas seleccionadas de 81.92 s para los vértices A, B, C mostrando el valor de las frecuencias Hz. en el eje horizontal y en el vertical muestra la amplitud en (m/s)².

En este sitio se observa que los espectros de potencia del vértice B muestran un pulso alrededor de 4 Hz para la mayoría de las ventanas, y presentan también dispersión en bajas frecuencias a partir de 0.3 Hz hasta 4 Hz. Esto solo se presenta en este vértice lo que probablemente fue afectado por una fuente local cerca de la estación de ese vértice. Figura 44.

En la siguiente figura 45 se ilustran las correlaciones cruzadas calculadas del arreglo 3 de Uruapan Michoacán, con 21 ventanas de 81.92 s. Las cuales se seleccionaron todas aquellas que mejor similitud tuvieran entre ellas y que tuvieran el mismo cruce por cero en el mismo rango de frecuencias.

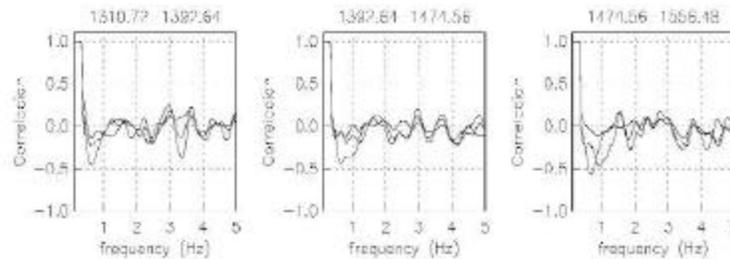


Figura 45. Correlaciones cruzadas para el arreglo 14, calculadas entre las tres estaciones para las 9 ventanas restantes de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

Para este caso se seleccionaron 3 ventanas de correlaciones cruzadas (1310.72, 1392.64, 1474.56) para calcular el coeficiente de auto-correlación de las tres estaciones como se muestra en la figura 46.

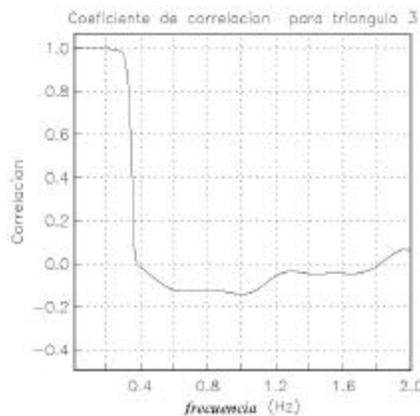


Figura 46. Coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo 3 para las ventanas seleccionadas (1310.72, 1392.64, 1474.56).

Una vez calculado el coeficiente de auto-correlación y definido el cruce por cero, se calculó curva de dispersión para este arreglo como se ilustra en la figura 47. Usando un modelo de una capa y un semi-especio.

Para este caso solo se definió un solo punto dentro de la curva de dispersión. Ya que en nuestro resultado, no se logró obtener una buena definición de una curva de dispersión (lo que se busca es que la curva de dispersión tenga una forma descendente lo que para este caso no se cumplió). Y para nuestro caso se obtuvo una curva muy pequeña, lo que nos proporciona muy poca información sobre la determinación de la capa. Esto debido a que el tren de ondas de los microtemores en el coeficiente de correlación muestra atenuación en la amplificación, lo que suponemos que representa una pérdida a la hora de determinar la curva de velocidad de fase. Considerando que no hay contribución en las variaciones laterales en la velocidad de ondas S y suponiendo que tenemos el mismo tipo de estratos podemos correlacionarlos con

los arreglos aledaños, esta suposición implicaría que solo tendríamos variaciones en el espesor de la capa. Esto se realizó para todos los arreglos que solo determinamos un solo punto dentro de la curva de velocidad de fase.

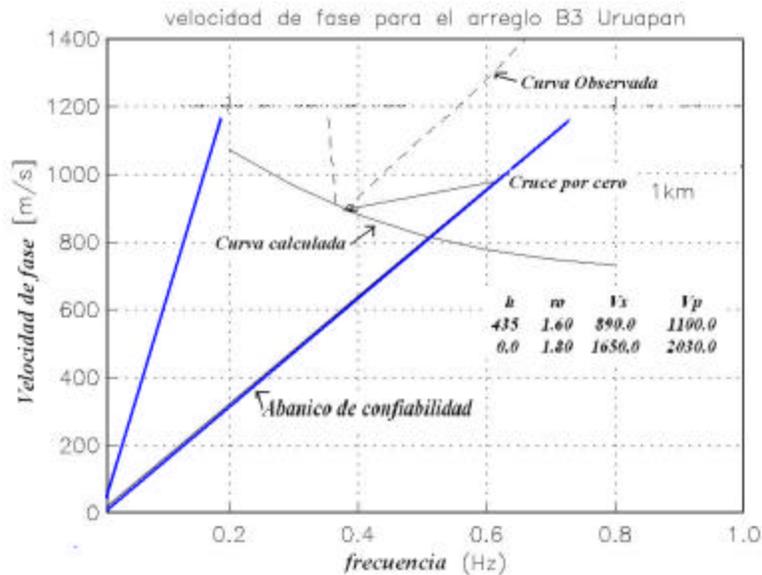


Figura 47. Curva de dispersión calculada (línea continua) y observada (línea punteada), mostrando así el cruce por cero, se muestra también con líneas rectas que parten de cero, el abanico de confiabilidad de Miyakoshi (1995).

III.3.9 Triángulo 10 Uruapan Michoacán.

Para este arreglo tiene una distancia entre sus vértices de 1km. primero se grafican los espectros de potencia calculados para las ventanas seleccionadas de 81.92 s para este arreglo ver figura 48.

En los espectros de potencia de los tres vértices mostrados en la figura 63. En el vértice B se observa que se tiene dispersión entre los espectros de potencia de las ventanas seleccionadas, tanto en altas y bajas frecuencias. Mientras que para los vértices A y C, en el rango de bajas frecuencias (0.3 a 2.0 Hz.) podemos observar menos dispersión que el vértice B.

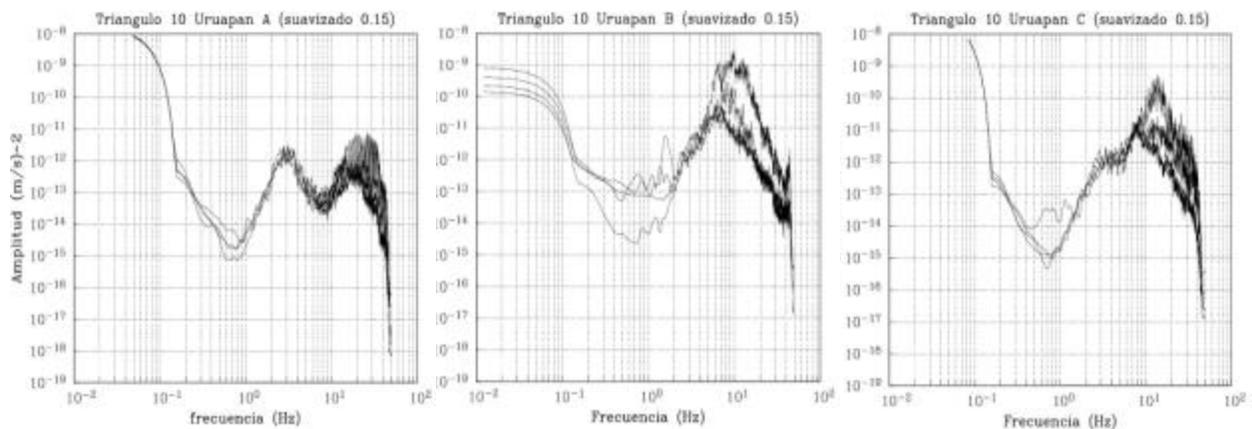


Figura 48. Espectros de potencia de todas las 4 ventanas de 81.92 s para los vértices A, B, C. mostrando el valor de las frecuencias Hz. en el eje horizontal y en el vertical muestra la amplitud en $(m/s)^2$.

Para este caso algunas de las ventanas que se seleccionaron muestran más dispersión con respecto a las demás (en este arreglo se seleccionaron 4 ventanas). Tal es el caso del vértice B, de los cuatro espectros

calculados dos de ellos tienen más amplificación con respecto a los otros dos esto se debe a que las fuentes locales están presentes cerca de la estación de registro.

En el vértice A y C se muestran menor dispersión en sus espectros de potencia salvo en 1 espectro de cada vértice pero el resto tiene la misma similitud entre ellas en el rango de frecuencias (0.3 a 2.0 Hz.).

En la siguiente figura 49 se ilustran las correlaciones cruzadas calculadas del arreglo 10 de Uruapan Michoacán, con 4 ventanas, las cuales se seleccionaron todas aquellas que mejor similitud tuvieran entre ellas y que tuvieran el cruce por cero en el mismo rango de frecuencias.

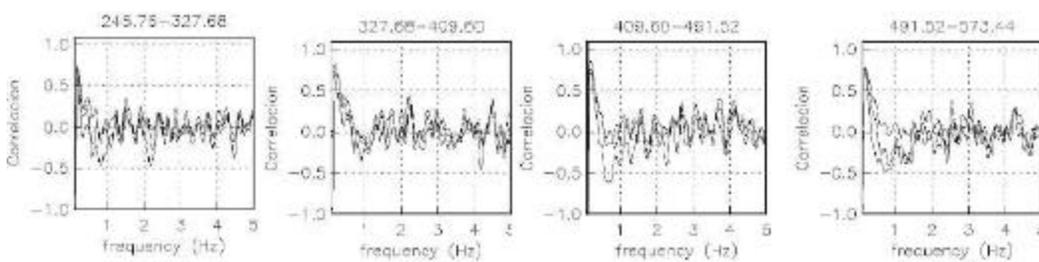


Figura 49. Correlaciones cruzadas para el arreglo 14, calculadas entre las tres estaciones para las 4 ventanas de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

Para este caso se seleccionaron 4 ventanas de las correlaciones cruzadas para las cuales se calculó el coeficiente de correlación de las tres estaciones como se muestra en la figura 50.

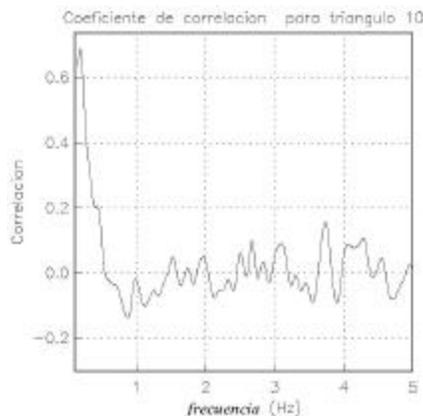


Figura 50. Coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo 10 para las ventanas seleccionadas .

Una vez calculado el coeficiente de auto-correlación y determinado el cruce por cero, se calculó la curva de dispersión como se muestra en la figura 51. Utilizando un modelo de una capa y un semi-especio.

Del cual solo se logró estimar un solo punto dentro de la curva de dispersión. Por que no se obtuvo una buena curva de velocidad de fase, considerando los arreglos más cercanos nos permitió determinar el modelo equivalente para determinar la capa resonante. Considerando también, que los efectos de los esfuerzos laterales no tiene mucha contribución en la propagación de los microtemores, lo que solo tenemos poca variación en la profundidad de los estratos. Haciendo esta consideración nos permitió definir la capa del estrato resonante.

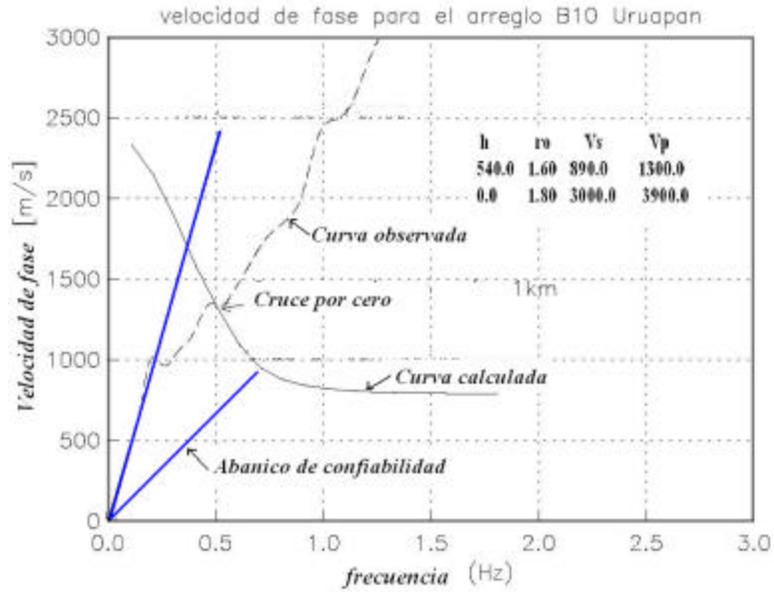


Figura 51. Curva de dispersión calculada (línea continua) y observada (línea punteada), mostrando así el cruce por cero, se muestra también con líneas rectas que parten de cero, el abanico de confiabilidad de Miyakoshi (1995).

III.3.10 Triángulo 15 Uruapan Michoacán.

Este arreglo tiene una distancia entre sus vértices de 1Km. se presentan los espectros de potencia calculados para las ventanas seleccionadas para este arreglo ver figura 52.

En los espectros de potencia mostrados en la figura 52 de los 3 vértices, tenemos que muestran dispersión en las 3 ventanas calculadas tanto en altas como en bajas frecuencias. Nótese que tienen también tres picos que pueden estar influenciados por las fuentes locales (Como las características físicas del sitio). Ya que este arreglo se encontraba dentro de parcelas de aguacate y en medio del arreglo cursaba un río.

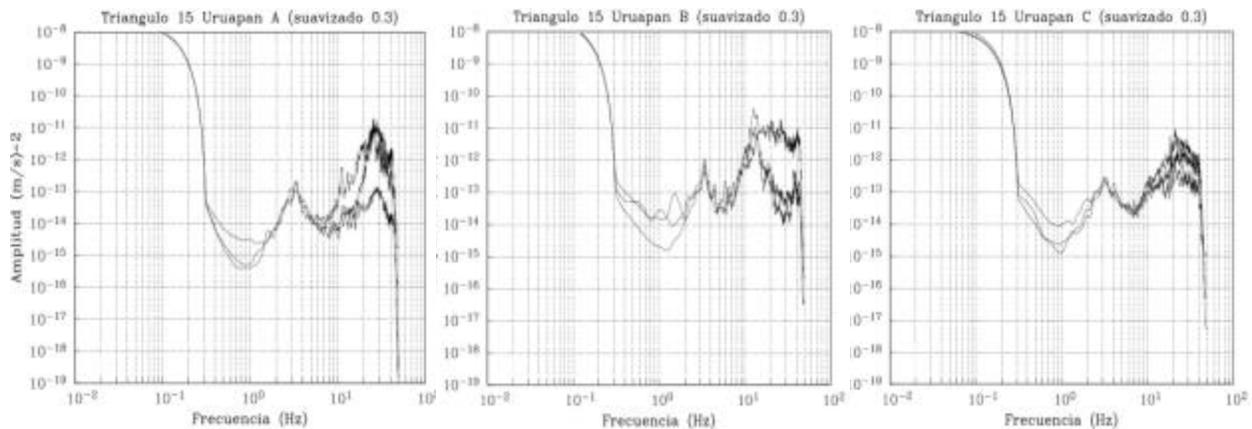


Figura 52. Espectros de potencia de todas las 3 ventanas de 81.92 s para los vértices A, B, C. mostrando el valor de las frecuencias Hz en el eje horizontal y en el vertical muestra la amplitud en $(m/s)^2$.

Después calcular los espectros de potencia, se calcularon las correlaciones cruzadas de las 21 ventanas en el arreglo 15 de Uruapan Michoacán, con 3 ventanas. De las cuales se seleccionaron todas aquellas que

tenían buena correlación cruzada entre las tres estaciones y tuvieran el mismo cruce por cero como se muestra en la figura 53.

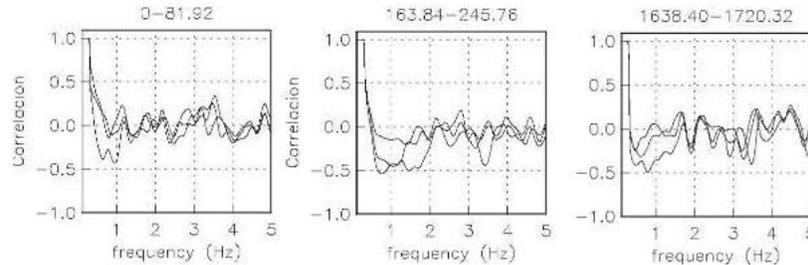


Figura 53. Correlaciones cruzadas para el arreglo15, calculadas entre las tres estaciones para las 3 ventanas restantes de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

Una vez seleccionadas las ventanas de correlaciones cruzadas de los tres vértices se calculó el coeficiente de auto-correlación de las tres ventanas seleccionadas como se muestra en la figura 54.

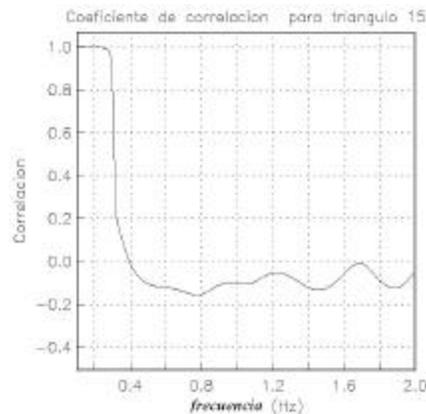


Figura 54. Coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo 15 para las ventanas seleccionadas (0.00, 163.84, 1638.40).

Una vez calculado el coeficiente de auto-correlación y determinado el cruce por cero, se calculó la curva de dispersión como se ilustra en la figura 55, utilizando un modelo de una capa y un semi-especio.

Para este arreglo solo se definió un solo punto dentro de la curva de dispersión. Por lo que en nuestro resultado, no se obtuvo una buena definición de una curva de dispersión. Lo que se busca es que la curva de dispersión tenga una forma descendente lo que para este caso no se cumplió. Y para nuestro caso se obtuvo una curva muy pequeña. Sin embargo esta nos puede proporcionar alguna información para definir el espesor de la capa (estrato) si además relacionamos el modelo obtenido en arreglos cercanos. (Como se realizó para los caso como este)

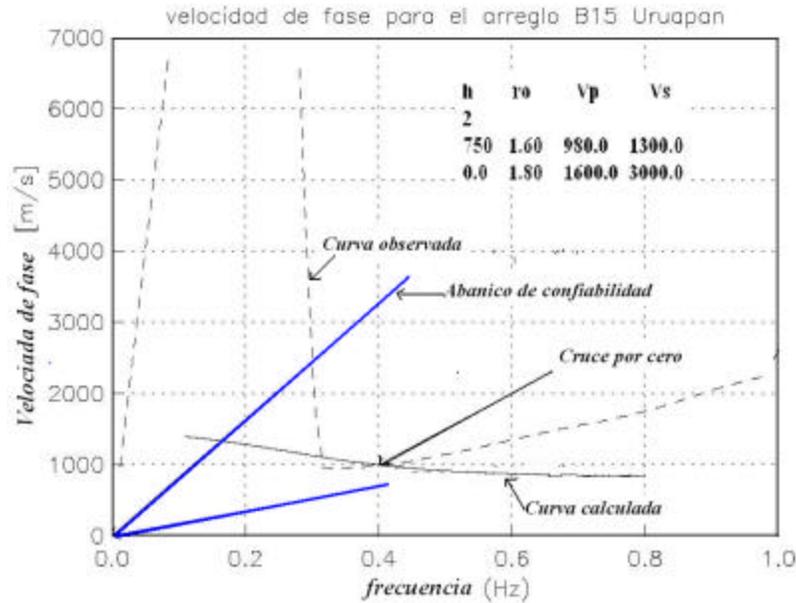


Figura 55. Curva de dispersión calculada (línea continua) y observada (línea punteada), mostrando así el cruce por cero, se muestra también con líneas rectas que parten de cero, el abanico de confiabilidad de Miyakoshi (1995).

III.3.11 Triángulo 17 Uruapan Michoacán.

En la figura 56 se observan los espectros de potencia calculados para las ventanas seleccionadas para este arreglo 17. En los espectros de potencia de las 3 ventanas de cada vértice (A, B, C) se observa que para el rango de frecuencias de nuestro interés menor a 1 Hz, se tiene que los espectros están muy dispersos. Lo que en este caso se le atribuye a las condiciones físicas (como la topografía y la actividad humana) del lugar donde se realizó este arreglo.

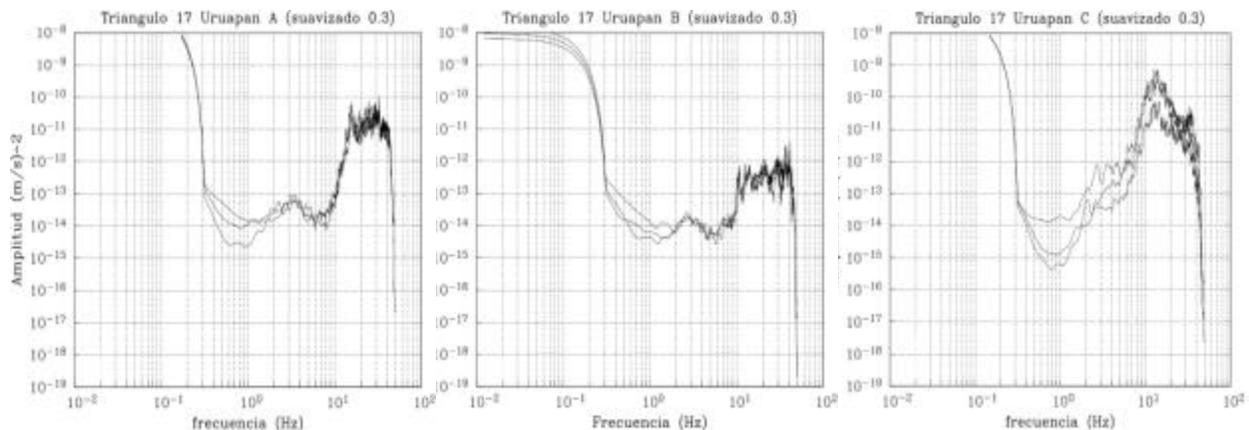


Figura 56. Espectros de potencia de las 3 ventanas de 81.92 s para los vértices A, B, C. mostrando el valor de las frecuencias Hz. en el eje horizontal y en el vertical muestra la amplitud en $(m/s)^2$.

Después de calcular los espectros de potencia se calcularon las correlaciones cruzadas para las 3 ventanas del arreglo 17 de Uruapan Michoacán. De las cuales se seleccionaron todas aquellas que tenían buena correlación cruzada entre las tres estaciones y tuvieran el mismo cruce por cero.

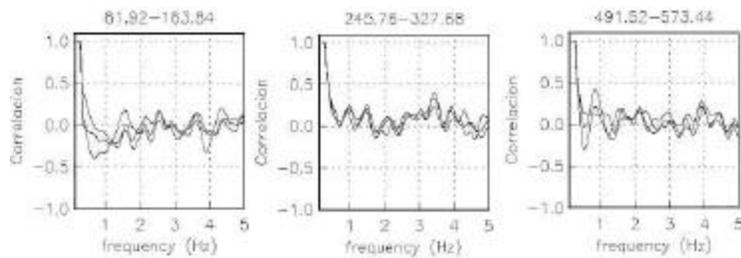


Figura 57. Correlaciones cruzadas para el arreglo 15, calculadas entre las tres estaciones para las 3 ventanas de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

Para este arreglo se seleccionaron 3 ventanas de correlación cruzada de las cuales se calculó el coeficiente de correlación de las ventanas seleccionadas como se muestra en la figura 58.

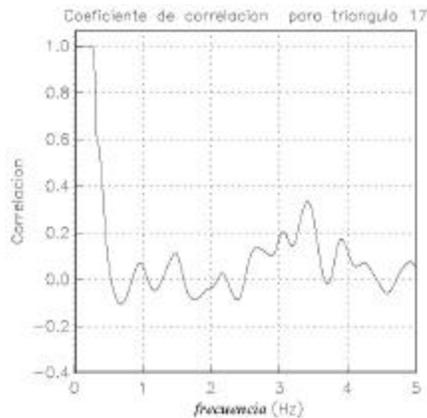


Figura 58. Coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo 17 para las ventanas seleccionadas (81.92, 245.76, 491.52).

Una vez calculado el coeficiente de auto correlación y definido el cruce por cero, se calculó la curva de dispersión como se presenta en la figura 59 utilizando un modelo de una capa y un semi-espacio.

Para este arreglo solo se definió un solo punto dentro de la curva de dispersión. Por lo que en nuestro resultado, no se obtuvo una buena definición de una curva de dispersión. Lo que se busca es que la curva de dispersión tenga una forma descendente lo que para este caso no se cumplió. Y para nuestro caso se obtuvo una curva muy pequeña, Sin embargo esta nos puede proporcionar alguna información para definir el espesor de la capa (estrato). Si además consideramos el mismo modelo obtenido en arreglos cercanos.

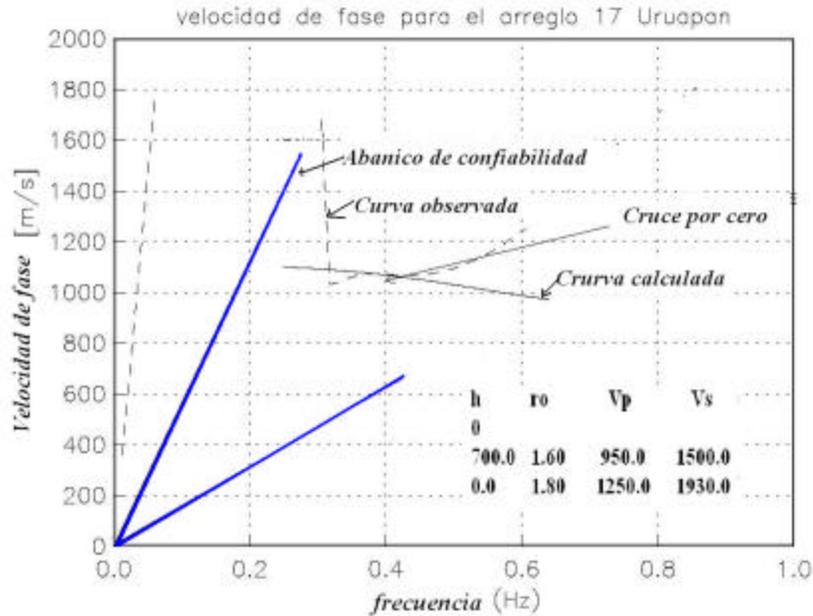


Figura 59. Curva de dispersión calculada (línea continua) y observada (línea punteada), mostrando así el cruce por cero, se muestra también con líneas rectas que parten de cero, el abanico de confiabilidad de Miyakoshi (1995).

IV. DISCUSIÓN Y RESULTADOS.

Con los estudios de microtemores realizados en la ciudad de Uruapan Michoacán, se llegó a invertir la curva de dispersión para ocho arreglos. Mientras que para otros cuatro arreglos se determinó un solo punto dentro de la curva de dispersión. Estos arreglos se invirtieron utilizando modelos estratigráficos de una sola capa y un semi-espacio lo que permitió definir únicamente la profundidad de una capa dura.

En los cuatro arreglos (3,10,15,17) en los que se obtuvo poca información, se supuso un modelo estratigráfico similar a los utilizados en arreglos cercanos. Esto permitió hacer una estimación de la estructura de velocidades de estos sitios. Lo que suponemos, es que estos sitios tienen una estratigrafía similar a los lugares cercanos en especial si consideramos los espesores grandes.

Con la modificación realizada en el cálculo de las correlaciones cruzadas (descrito en el apartado III), se obtuvieron mejores resultados. Ésta modificación permitió determinar mejor la curva de dispersión para los arreglos 1,2, 4, 5, 8, 9, 12 y 14.

En los modelos utilizados para las inversiones se consideraron valores de densidad de 1.6 y 1.8 ton/m^3 para la primera capa y el semi-espacio respectivamente. Se estimaron velocidades de ondas S, en un rango de 700 m/s hasta 1000 m/s. Se obtuvieron velocidades de ondas P en el rango de 900 a 1900 m/s y espesores que van de 400 a 840 m. A continuación se muestran los resultados de los modelos con los que se calcularon las curvas de dispersión en los ocho arreglos (Ver tabla1).

Arreglo Triangular	Capas	Espesor (m.)	Densidad d (ton/m ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)
1	capa	480	1.6	700	900
	Semi-espacio	0	1.8	1500	1980
2	Capa	375	1.6	890	1100
	Semi-espacio	0	1.8	1550	2030
4	Capa	600	1.6	850	990
	Semi-espacio	0	1.8	2740	3500
5	Capa	840	1.6	950	1900
	Semi-espacio	0	1.8	1750	3000
8	Capa	540	1.6	890	1280
	Semi-espacio	0	1.8	3500	5600
9	Capa	580	1.6	700	1000
	Semi-espacio	0	1.8	1650	2050
12	Capa	650	1.6	1000	1400
	Semi-espacio	0	1.8	2800	3600
14	Capa	650	1.6	890	1090
	Semi-espacio	0	1.8	3400	4300

Tabla 2. Resultados de los modelos utilizados en la estimación de la curva de dispersión calculada para distintos arreglos triangulares colocados en la ciudad de Uruapan Michoacán (el espesor del Semi-espacio se considera infinito).

En el mapa de la ciudad de Uruapan Michoacán (figura 60) se muestra la ubicación de los arreglos triangulares para los cuales se logró estimar la curva de dispersión (con línea continua roja). Dentro los triángulos se muestra el número de arreglo (con número Romano) y junto a éstos los valores de profundidad de exploración encontrada. Los arreglos representados con línea punteada azul, son los arreglos en los que se estimó un solo punto dentro de la curva de dispersión. Los arreglos mostrados con línea (delgada) continua negra, son los arreglos en los que no se obtuvieron buenas correlaciones entre sus tres vértices.

Mapa de los arreglos calculados con el método SPAC para la Ciudad de Uruapan Michoacán

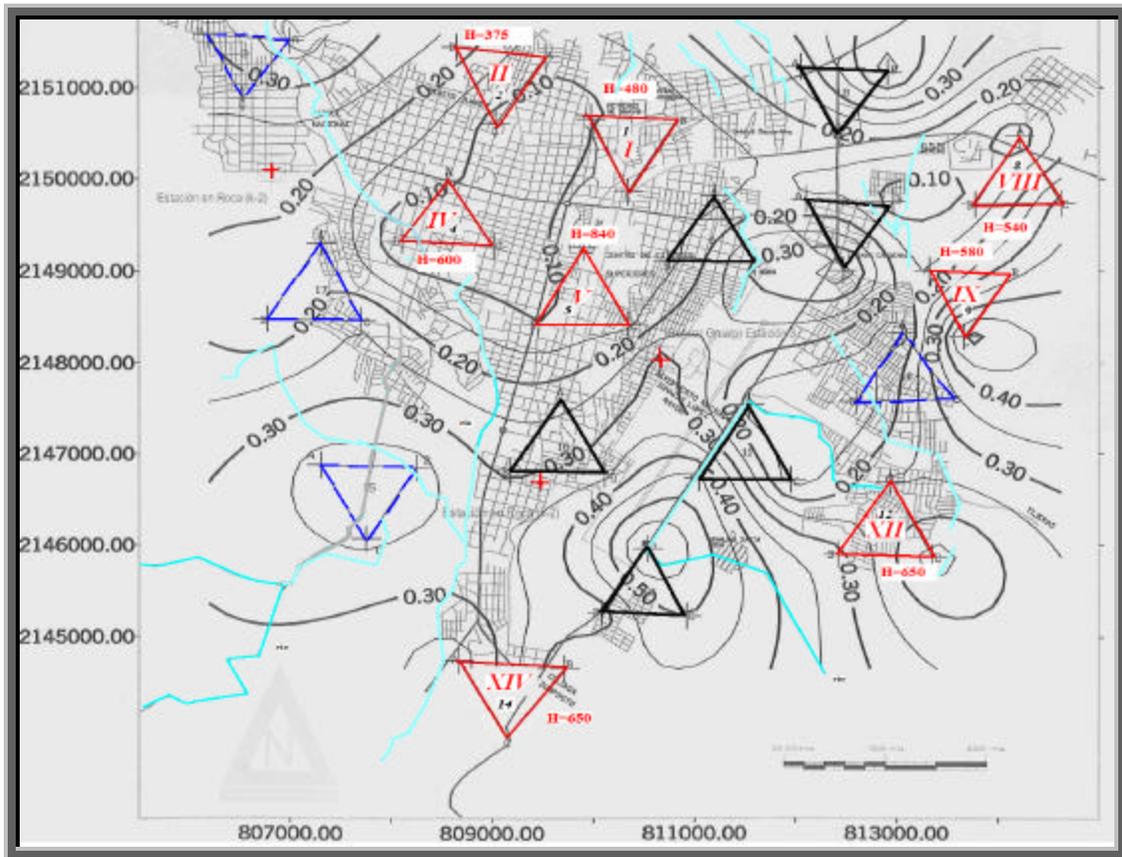


Figura 60. Mapa de isoperiodos calculado y los arreglos en los cuales se obtuvo una estimación de la estructura de velocidades, los contornos están dados en s y las acotaciones del plano están en UTM.

En los arreglos 1,2, 4, 5, 8, 9, 12 y 14 se determinó la curva de dispersión usando un modelo de una capa muy gruesa y un semi-espacio. El hecho de que sean pocos arreglos los que dieron buenos resultados, se atribuye a que los arreglos realizados son relativamente grandes y el rango de frecuencias que estamos observando es alrededor a de 0.4Hz – 0.6 Hz. Debido a ello solo fue posible explorar una parte de la curva de dispersión en bajas frecuencias. Por lo que, solo pudimos observar estratos profundos (entre 400 y 840 m). Por otro lado, si queremos tener una mejor definición de la curva de dispersión, en altas frecuencias para visualizar hacia estratos más superficiales es necesario conjuntar los resultados con arreglos de menor abertura para tener una mejor definición de las capas mas superficiales.

Una explicación a la falta de correlación entre los arreglos 13, 11, 16, 6, 7 y 18. Como podemos observar en la figura 61 es por que en los registros de microtremores de las tres estaciones se observan efectos de fuentes muy locales. Los tres primeros registros muestran una gran presencia de transitorios en al menos uno de los registros para diferentes ventanas de tiempo. lo que puede ser la causa de no tener buenas correlaciones entre las señales de microtremores. Sin embargo existen arreglos en los que también hay presencia de transitorios pero muestran buenas correlaciones. Las ultimas tres señales que se muestra en la figura 61 son las mismas pero filtradas con un filtro pasa baja hasta 2 Hz. Esto se realizó porque el rango de frecuencias que se analizó es para frecuencias bajas menores a 1Hz. En estos registros podemos ver claramente que la influencia del ruido local sigue estando presente pues las tres señales muestran una diferencia de transitorios lo que constituye un factor determinante en la falta de correlación entre las estaciones de los arreglos.

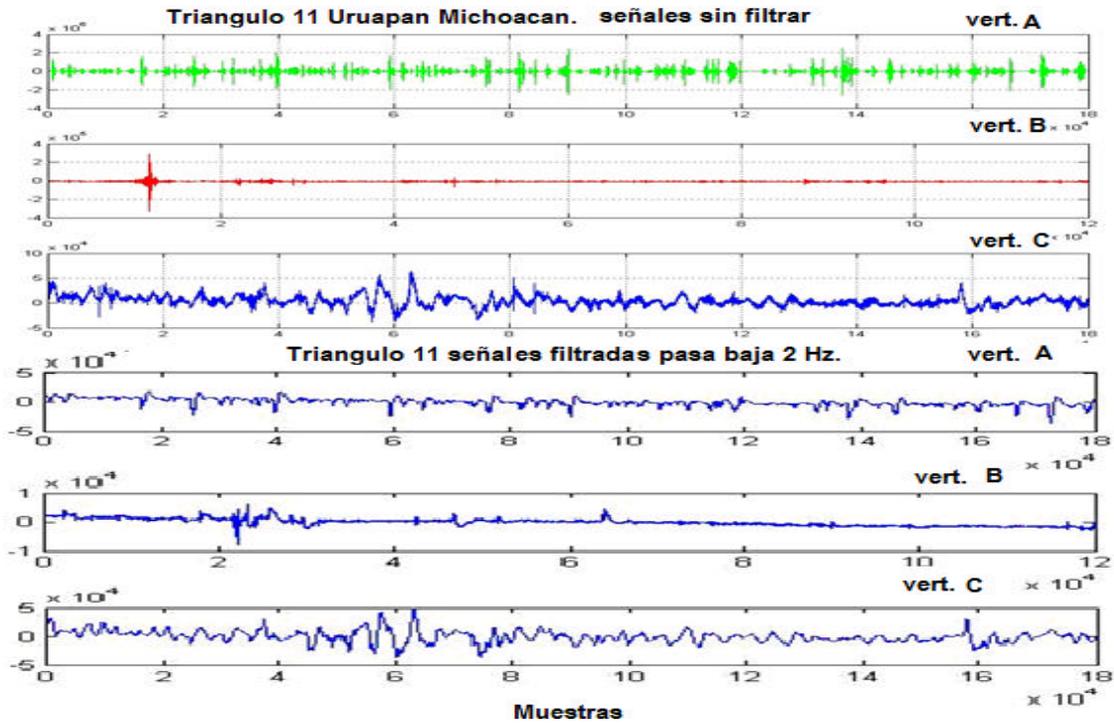


Figura 61. Muestra los registros de microtremores en el arreglo 11 (componentes verticales), las primeras tres señales se ilustran sin filtrar, las últimas tres señales se aplicó un filtro pasa bajas hasta 2 Hz.

En la figura 62 se muestran señales de microtremores del arreglo 14. En este arreglo se obtuvieron buenas correlaciones. Las primeras tres señales están sin filtrar y muestran presencia de transitorios muy semejantes a los que se ilustraron en la figura 61. Pero a diferencia de estas, a la hora de filtrar las señales del arreglo 14 (con un filtro pasa baja de 2 Hz) muestran un comportamiento similar entre las señales de microtremores. Por ejemplo las dos primeras señales muestran bastantes transitorios, Pero cuando observamos a estas mismas señales filtradas (con el filtro pasa baja de 2 H.), los transitorios prácticamente se eliminan y las primeras señales que parecían diferentes ahora muestran un nivel de ruido muy similar. Esto explica el porqué pudimos obtener mejores correlaciones.

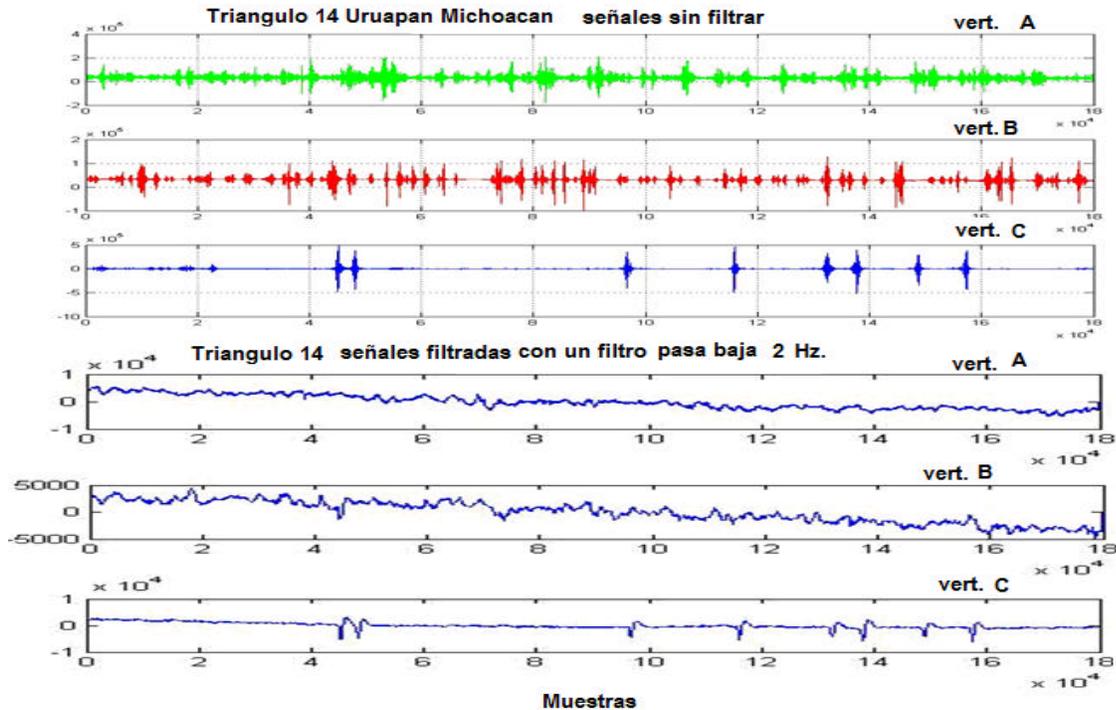


Figura 62. Muestra los registros de microtremores en el arreglo 11 (componentes verticales), las primeras tres señales se ilustran sin filtrar, las últimas tres señales se aplicó un filtro pasa bajas hasta 2 Hz.

Éstos son factores muy importantes y pueden explicar la falta de correlación entre las estaciones situadas en condiciones de ruido distintas.

Como se puede ver en la figura 60, de acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que en la parte sureste de la ciudad no se pudo obtener buenas correlaciones en los arreglos con aberturas de 1 Km y 950 m. Esto se atribuye a la presencia de fuentes muy locales. A priori, podríamos considerar que la presencia de cauces de ríos y grandes desniveles topográficos podrían influir en nuestros resultados. Explorando la distribución de los ríos en la ciudad observamos que 5 de los 8 arreglos que no tenían cruces de ríos tuvieron buena correlación. Pero, de los 8 arreglos que mostraron buenos resultados 2 de ellos muestran casos especiales por ejemplo el arreglo 4 atraviesa un cauce de río y sin embargo se obtuvieron buenas correlaciones. Por otro lado en el arreglo 2 se tiene el mayor desnivel topográfico (120m) de todos los arreglos y, sin embargo, las correlaciones obtenidas son buenas. Mientras que, algunos arreglos que tienen desniveles menores a 10 m, no presentaron buenas correlaciones. Si bien existe una cierta relación entre los arreglos que no tuvieron buena correlación y el hecho de que atravesase un cauce de río entre las estaciones del arreglo, no existe lógica alguna entre las malas correlaciones y los cambios bruscos en su topografía. Por lo que las buenas correlaciones dependen más de la ausencia de fuentes muy locales. Esto queda de manifiesto al observar el rango de frecuencias menor a 1 Hz donde las estaciones mostraron el mismo nivel de ruido con una ausencia de transitorios en los intervalos de análisis.

Para definir la estratigrafía superficial con más detalle, se sugiere realizar nuevas mediciones en varios triángulos de menores aberturas en la zona sur de la ciudad de Uruapan.

IV.1 CONCLUSIONES.

Se analizaron 18 arreglos instrumentales en la ciudad de Uruapan. En cada arreglo se contó con registros de 30 minutos consecutivos grabados simultáneamente en tres estaciones localizadas en los vértices de los triángulos equiláteros y separadas a 1 Km y 950 m una de otra. Se utilizaron sensores Guralp de banda ancha (40 s) conectados a digitalizadores Reftek y conectados a un disco SCII.

De los 18 arreglos analizados se obtuvieron resultados para ocho arreglos que presentaron buenas correlaciones. Éstos fueron modelados utilizando modelos estratigráficos de una sola capa y un semi-espacio. Para los diferentes modelos, las capas más superficiales presentaron velocidades que varían entre 700 m/s y 1000 m/s para las ondas S, y para las velocidades de ondas P se presentaron velocidades que varían entre 900 m/s y 1400 m/s. Ésta capa relativamente gruesa, con un espesor entre 400 y 840 m, corresponde al modelo equivalente de una serie de estratos. Esta aproximación burda es debido a que la abertura de los arreglos solo nos permitió explorar frecuencias bajas ($< 1\text{Hz.}$).

Para los cuatro arreglos (3, 10, 15, 17), solo se pudo estimar un punto dentro de la curva de dispersión. Este efecto es atribuido a las fuentes cercanas a las estaciones, así como también a las condiciones locales de los sitios. Estos puntos localizados dentro de la curva de dispersión, pueden ser de gran utilidad para mediciones posteriores. Si se realizaran mediciones con arreglos más pequeños estos puntos nos ayudaran a definir la curva de dispersión en el rango de bajas frecuencias. Ya que el rango de frecuencias altas lo controlamos con las aberturas menores.

Lo que se propone para obtener una mejor definición de la estructura de velocidades es realizar arreglos de menor abertura. Esto con el fin de obtener una mejor definición de la curva de dispersión, ya que el rango de frecuencias que se exploró es hacia bajas frecuencias, y con los arreglos menores se podrá explorar hacia frecuencias más altas y nos permita determinar las características elásticas de los estratos más superficiales. Haciendo varios arreglos bien distribuidos en toda la zona permitirá determinar con mayor detalle la estructura de velocidades de toda la ciudad de Uruapan Michoacán.

El determinar la estructura de velocidades con mayor detalle nos permitirá realizar estudios de peligrosidad sísmica con mayor precisión, así como también el realizar evaluaciones de escenarios sísmicos. Este tipo de estudios nos dará a conocer las características dinámicas del sitio con mayor eficacia ante la ocurrencia de un sismo. Y por otro lado el contar con este tipo de información será de gran utilidad para mejorar el reglamento de construcciones del estado Michoacán.

Este estudio realizado en la ciudad de Uruapan Michoacán permitió obtener los periodos dominantes utilizando el método de cocientes espectrales H/V (Nakamura). Así como también la estimación de una estructura de velocidades profunda aplicando el método SPAC en la ciudad de Uruapan Michoacán.

V. Parte II

*“ESTUDIO DE VIBRACION AMBIENTAL
APLICANDO EL METODO SPAC
EN LA CIUDAD DE
MONTERREY NUEVO LEÓN”.*

VI. ESTUDIO DE VIBRACION AMBIENTAL APLICANDO EL MÉTODO SPAC EN LA CIUDAD DE MONTERREY NUEVO LEÓN.

Para el estudio de riesgo sísmico, una de las partes principales es conocer el efecto de sitio, el cual lo podemos conocer por medio del estudio de microtremores (vibración ambiental). Un primer acercamiento consiste en obtener el periodo dominante del sitio usando H/V (de Nakamura), como se muestra en el apéndice de este trabajo, sin embargo el periodo dominante solo, no permite describir el efecto del sitio en su totalidad y no nos proporciona datos de la estratigrafía.

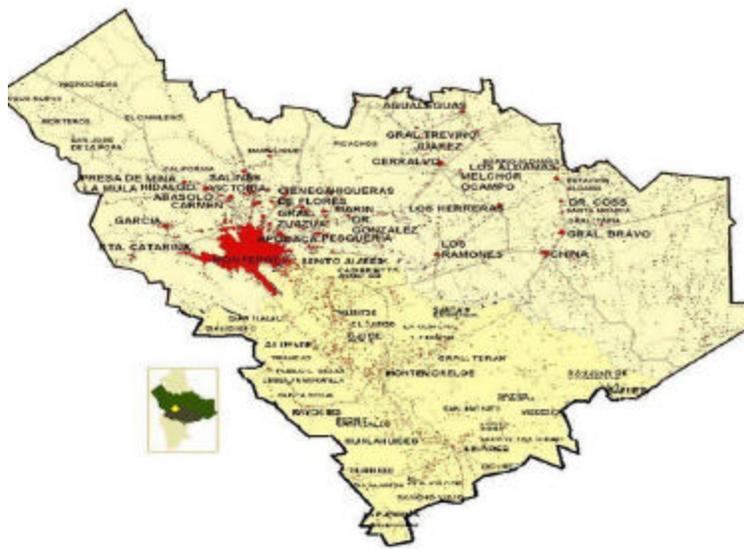
Para el presente trabajo se utilizó el método SPAC en la ciudad de Monterrey Nuevo León donde se realizaron 13 arreglos instrumentales en forma de triángulos equiláteros con diferentes aberturas con una máxima de 280 m y una mínima de 7.5 m localizados en cuatro sitios de Monterrey. Los equipos que se utilizaron fueron sensores Guralp de banda ancha CMG40T conectados a un sistema de adquisición de datos Reftek.

Los sitios donde se realizaron las mediciones fueron en la colonia Roma, el estacionamiento del Estadio de fútbol de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), lecho del río Santa Catarina y el último fue en un predio (PL4V) cercano al centro de la ciudad de Monterrey, Nuevo León. Como se muestra en la imagen 1



Imagen 1. Muestra la ubicación de los arreglos realizados en la ciudad de Monterrey N. L. (Esta imagen se obtuvo de google Earth).

VII. ANTECEDENTES LOCALES DE MONTERREY, NUEVO LEÓN.



Población total	1'110,997 Hab.
% con respecto al total estatal	28.97
Urbana	100 %
Rural	0
Número de localidades	10
Tasa de crecimiento anual (1990-2000)	0.39 %
Densidad de población	2,461 Hab./Km ²
Población de 0-14 años	26.40 %
de 15-en adelante	73.60 %
Población económicamente activa municipal	452,924 Hab.
Población económicamente activa sector primario	1,393 Hab
Superficie total	45,130 Has.
Superficie forestal	4,375 Has
Otros usos	40,755 Has.
Número de ejidos	2
Número de ejidatarios	191
Número de colonias	0
Número de colonos	0
Número de pequeños propietarios	250
Datos del clima	
Altura	500-2100 msnm
Temperatura media anual	20 a 22 °C
Precipitación media anual	586 mm
Clima	Semi Seco Semi Cálido Lluvias de Verano % de Precipitación Invernal entre el 5 y 10.2 Invierno Fresco

Tabla 3. Muestra antecedentes locales. (Fuente: Anuario Estadístico 2002 Nuevo León, SAGARPA (Datos poblacionales INEGI)).

VIII. DESCRIPCIÓN DE LOS ARREGLOS.

En cuatro sitios de la Ciudad de Monterrey se desplegaron arreglos consistentes de tres estaciones localizadas en los vértices de triángulos equiláteros con diferentes aberturas. Las mediciones se realizaron en forma simultánea. Las aberturas variaron de acuerdo a las condiciones de cada punto de observación siendo el arreglo más grande de 280 m en la localidad que llamamos PL4V localizado en la zona centro de la ciudad. A continuación se realiza una breve descripción de cada uno de los sitios en donde se realizaron los arreglos.

VIII.1 Arreglos en el estadio de la Universidad Autónoma de Nuevo León (EST).

Este sitio se ubicó en el estacionamiento del estadio de fútbol de la Universidad Autónoma de Nuevo León y colinda con la avenida Universidad. Las coordenadas del punto central son: latitud 25.7199° N, Longitud 100.3150° W. En este sitio se realizaron cuatro arreglos con aberturas de 7.5, 15, 50 y 150 m debido a las condiciones del sitio. Por ser este el sitio donde se iniciaron las mediciones, previo a los arreglos se realizó una prueba de calibración. La prueba consistió en observar microtemores por un lapso de tiempo de 20 minutos con todos los sensores juntos. En la figura 63 se muestra la localización de los arreglos y la posición relativa de cada estación.



Figura 63. Esquema de los arreglos realizados en el estacionamiento del estadio de fútbol de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

VIII.2 ARREGLOS EN LA COLONIA ROMA (RM).

Estos arreglos se realizaron en un parque de la colonia Roma y calles aledañas. Localizado al sureste de la zona centro de Monterrey, Nuevo León. Las coordenadas del centro de los arreglos son: latitud 25.6527°

N, longitud 100.2960° W. En esta localidad se pusieron los siguientes arreglos a 27, 50 y 150 m de abertura con respecto al centro. En la figura 64 se muestra la posición del arreglo en forma esquemática.

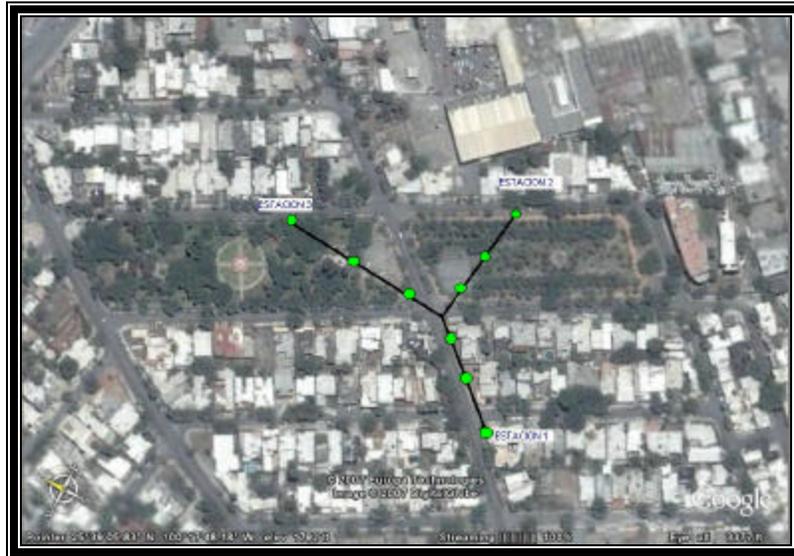


Figura 64. Esquema de los arreglos realizados en la colonia Roma, Monterrey Nuevo León.

VIII.3 ARREGLOS EN EL LECHO DEL RIO SANTA CATARINA (RSC).

Estos arreglos se localizaron en el borde oriente del lecho del río Santa Catarina. En este lugar se localizan canchas deportivas de béisbol. Debido a las dimensiones del terreno se realizaron únicamente 3 tamaños de arreglos de 7.5, 15 y 50 m. Las coordenadas del centro del arreglo son: latitud 25.6643° N, longitud 100.3215° W. En la figura 65 se muestra la ubicación de las estaciones en cada arreglo.



Figura 65. Esquema de los arreglos realizados en el lecho del río Santa Catarina, Monterrey, Nuevo León.

VIII.4 ARREGLOS REALIZADOS CERCA DEL CENTRO DE LA CIUDAD EN UN SITIO CONOCIDO COMO EL PREDIO DE LOS 4 VIENTOS (PL4V).

Estos arreglos se ubicaron en un extenso terreno muy cerca del centro de la ciudad en donde se construirán algunos desarrollos comerciales y habitacionales. Dentro de este extenso terreno limitado por las avenidas Guerrero, Ruiz Cortinez y Progreso se realizaron cinco arreglos de 7.5, 15, 50, 150 y 280 m en el lugar conocido como los cuatro vientos. El centro de los arreglos tiene como coordenadas: latitud 25.6933°N longitud 100.3062°W . En la figura 66 se muestra en forma esquemática la posición de cada estación en los diferentes arreglos.



Figura 66. Esquema de los arreglos realizados en el predio cercano al Centro de la ciudad de Monterrey, Nuevo León.

VIII.5 Equipos

Los equipos que se utilizaron para medir la vibración ambiental fueron sensores de banda ancha GURALP de 3 canales conectados a sistemas de adquisición digital marca REFTEK que cuentan con una antena de GPS para la sincronía del tiempo. Un ejemplo de una de las estaciones se puede observar en la figura 67.



Figura 67. Equipos usados en la observación de microtremores. En el lado izquierdo, en la caja gris se encuentra el sistema de adquisición digital Reftek, junto a la caja se encuentra el acumulador que provee de energía tanto al

Reftek como al sensor. Del lado derecho aparece el sensor en el momento en que esta siendo orientado. La foto es de una de las estaciones del arreglo desplegado en la colonia Roma, Monterrey, Nuevo León.

Antes de abordar el tema de la aplicación del método SPAC se anexan antecedentes locales de la ciudad de Monterrey, N. L.

La ciudad de Monterrey y su zona metropolitana, representan al tercer núcleo poblacional más grande dentro del país. Conocida como la Sultana del Norte, Monterrey, se caracteriza por su alto desarrollo industrial y es una de las zonas metropolitanas con un gran crecimiento poblacional, por lo que, es necesario dentro de los planes de desarrollo contar con estudios detallados de las características geotécnicas del subsuelo ya que son de gran importancia dentro del desarrollo de las obras civiles.

IX. Contexto geodinámico y geología regional del Estado de Nuevo León.

Monterrey y su área metropolitana está localizada al noreste de México, en los límites de las provincias geológicas de la Sierra Madre Oriental y la Planicie costera del Golfo. El noreste de México es generalmente considerado como una región tectónicamente estable, caracterizada por su baja sismicidad, en el norte de México y al sur de los estados Unidos de América, se han reportado algunos sismos históricos tales como el sismo de 1887 Bavispe, Sonora (Mw =7.4; Natali y Sbar, 1982), Parral 1928, Chihuahua (Mw 6.5; Doser, 1987), Valentine Texas 1931 (Mw= 6.4 Doser 1987) y recientemente por el sismo de Alpine, Texas de 1995,(Mw 5.7; Xie,1998) ver figura 68. Esta figura muestra las localizaciones epicentrales de estos eventos y los tres principales rasgos estructurales (Lineamientos y fallas corticales) con direcciones norte-noroeste que han sido identificadas o postuladas para el noroeste de México;

- La falla La Babia (incluye el lineamiento Sabinas-Boquillas y la falla de sabinas) la cual cruza el noreste de Coahuila.
- En la parte central de Coahuila, esta definida la falla de San Marcos o el lineamiento Sierra Mojada-China (existen dos lineamientos relacionados con esta falla, el lineamiento Caltam y la falla de Monclava).
- Algunos autores han propuesto la existencia de un gran sistema lateral izquierdo en el norte de México: -zona de falla Saltillo-Torreón, la falla de Torreón-Monterrey y la mega falla de Mojave-Sonora (McKee, J.W. Jones y Long,L.E 1990).

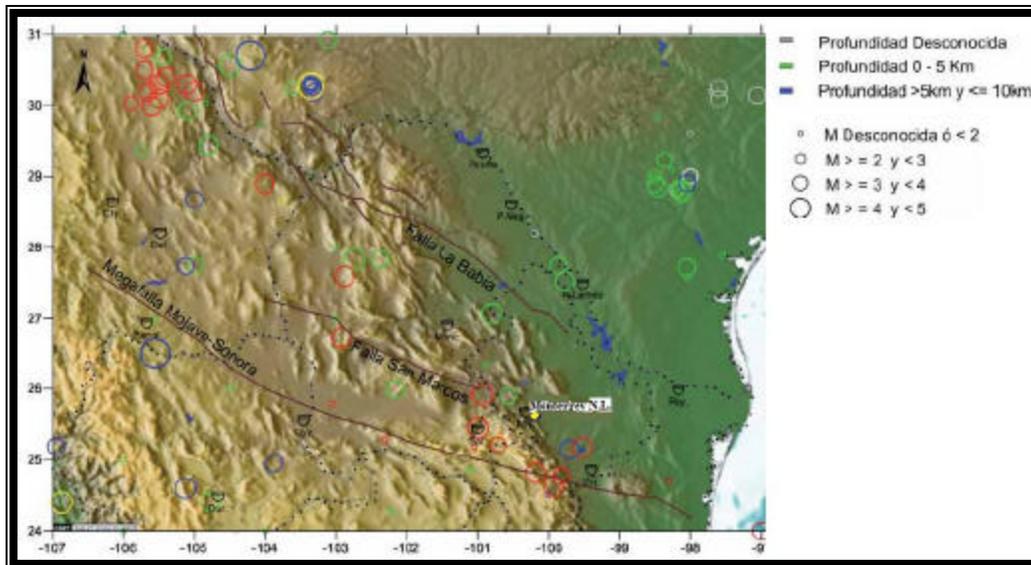


Figura 68. Muestra la sismicidad histórica del noroeste de México y sur de Texas (1928-2004) y principales lineamientos y fallas que han sido identificados o postulados en esta región. Los círculos grandes representan los mayores sismos que se han generado en la región. M representa la magnitud local. Se muestran algunas ciudades (Chi:Chihuahua, Del:Delicias, Dur:Durango, Tor:Torreon, Mon:Monclava, Sal:saltillo, Mty:Monterrey, Lin:Linares, P. Neg:Piedras Negras, Rey:Reynosa). (Montalvo-Arrieta, et al 2005).

Algunos autores como McKee, J.W. Jones y Long, L.E (1984,1990) y Muehlberger, Blecher y Gotees (1978), han propuesto que estas fallas han presentado varios periodos de activación a través del tiempo, desde el periodo Jurásico hasta el terciario, incluyendo el cuaternario. Se ha observado que la orientación de los esfuerzos horizontales máximos en esta región es paralela a la dirección de los esfuerzos presentes en el *rift*, es decir el hundimiento del terreno es debido a la presencia de fallas de desplazamiento normal: del Río Grande y las fallas de edad Cuaternaria localizadas al oeste del estado de Texas, EEUU y noreste de Chihuahua. Por lo que la dirección, del campo de esfuerzo horizontal mínimo actual en el noroeste-suroeste ha favorecido la reactivación de estas fallas con una componente de extensión.

Galván-Ramírez y Montalvo-Arrieta (2007) mencionan que un posible escenario crítico sería la ruptura del segmento sur de la falla de San Marcos localizada en la parte central de Coahuila. La importancia de este escenario es la incidencia en tres de las ciudades o zonas metropolitanas más importantes del noroeste de México, desde un punto de vista poblacional e industrial tales como Monterrey, Saltillo y Monclova, localizadas en un radio menor de 150 km de la fuente de la falla ver figura 68.

En el estado de Nuevo León afloran principalmente rocas sedimentarias de origen marino (depósitos clásticos y químicos de edad mesozóica). Las rocas más antiguas de Nuevo León son esquistos de edad precámbrica que afloran en el área de Aramberri, N. L.

La mayor parte de las rocas que forman grandes estructuras plegadas (anticlinales y sinclinales), que caracterizan a la Sierra Madre Oriental, son del Mesozoico. Los depósitos más recientes están constituidos por conglomerados y suelos aluviales, que pertenecen al Cuaternario.

El estado de Nuevo León queda comprendido dentro de tres provincias: la planicie Costera del Golfo Norte, la Sierra Madre Oriental y la Gran planicie de Norteamérica.

IX. A Geología del Área Metropolitana de Monterrey, Nuevo León.

El área metropolitana de Monterrey Nuevo León, esta localizada en la parte frontal de la Sierra Madre Oriental, al norte de la Saliente de Monterrey (Padilla y Sánchez, 1982). En esta porción el eje principal de la cadena montañosa cambia su rumbo de dirección N-S a E-W, de ahí el nombre de Curvatura o Saliente de Monterrey. Esta variación en la orientación de la Sierra Madre Oriental, juega un papel muy importante en el control estructural, geométrico y de aporte de sedimentos al valle de Monterrey.

El basamento geotécnico del valle de Monterrey, se encuentra definido por lutitas y margas de la Formación Méndez de edad Cretácico Superior (Cavazos Tovar, 2007). Las rocas sedimentarias están compuestas por calizas y afloramientos de lutitas, estas en los bordes del valle y en algunas partes de las montañas. Dentro del valle, se localizan además algunos lomeríos, como son la Loma Larga y Loma Linda dos anticlinales definidos por calizas de la Formación Méndez. San Felipe y lutitas de la Formación Méndez respectivamente. Las grandes estructuras montañosas que controlan además de la geometría del valle, corresponden al Cerro de la Silla, Cerro de Las Mitas y Cerro del Topo Chico. Estas estructuras están formadas secuencias calcáreas del Mesozoico (ver figura 69).

Los sedimentos Cuaternarios corresponden a depósitos aluviales, fluviales y limos, generados por la erosión de las estructuras montañosas y el arrastre fluvial debido a los ríos Santa Catarina, La Silla y otros afluentes secundarios (Alva Niño, 1995).

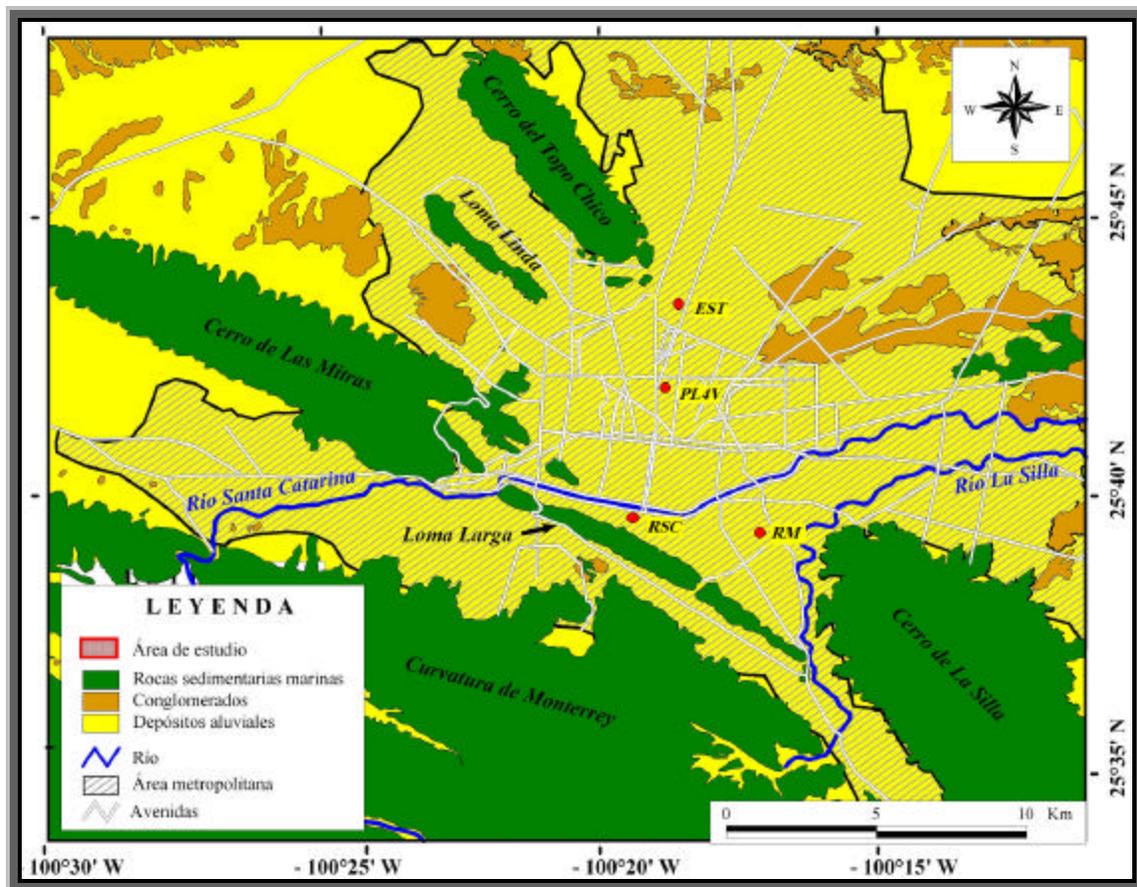


Figura 69. Muestra la geología superficial de la Ciudad de Monterrey Nuevo León (Tomado de Cavazos Tovar, 2007).

X. APLICACIÓN DEL MÉTODO SPAC.

A continuación se describe la aplicación del método SPAC a los datos de microtrémores, a través de procesar las componentes verticales de los registros.

X.1 Procesado de los registros.

- Se cortaron 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 ventanas, el suavizado y la obtención de los coeficientes de correlación, se realizan con un programa en Fortran.
- Se leen los archivos truncados con un encabezado.
- Se leen ventanas de tiempo seleccionadas de (81.92 s).
- Se obtienen los espectros de potencia para cada ventana y cada estación.
- Se calculan los coeficientes de correlación.
- Se calcula el promediado de los coeficientes de correlación.
- Se calcula la curva de dispersión de ondas Rayleigh.

Después de llevar a cabo todos estos pasos, se procede a estimar el modelo de velocidades para cada arreglo, y finalmente, con la información de todos los arreglos, se genera un modelo en tres dimensiones.

En este caso, se calculan las correlaciones cruzadas entre los tres vértices A, B, C, al mismo tiempo y en una dirección, es decir de AB, BC, CA como se muestra en la figura 70. Al igual que se imprimen en una sola gráfica, las tres correlaciones obtenidas. Esto nos permite ver el tren propagación de los microtrémores por medio de la correlación cruzada dentro del arreglo instrumental. Ya que estas ondas son consideradas como multi-direccionales.

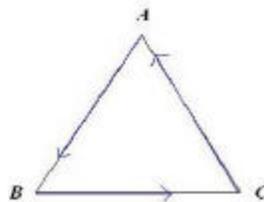


Figura 70. Arreglo triangular.

XI. ARREGLOS REALIZADOS EN EL LECHO DEL RÍO SANTA CATARINA.

Aplicación del método SPAC en el arreglo realizado en el lecho del río Santa Catarina (RSC) con registros de 1800 s de grabación con dos arreglos instrumentales uno de 7.5 m y otro de 15 m Como se muestra a continuación. Las trazas de los sismogramas del arreglo de 7.5 m se muestran en la Figura 71.

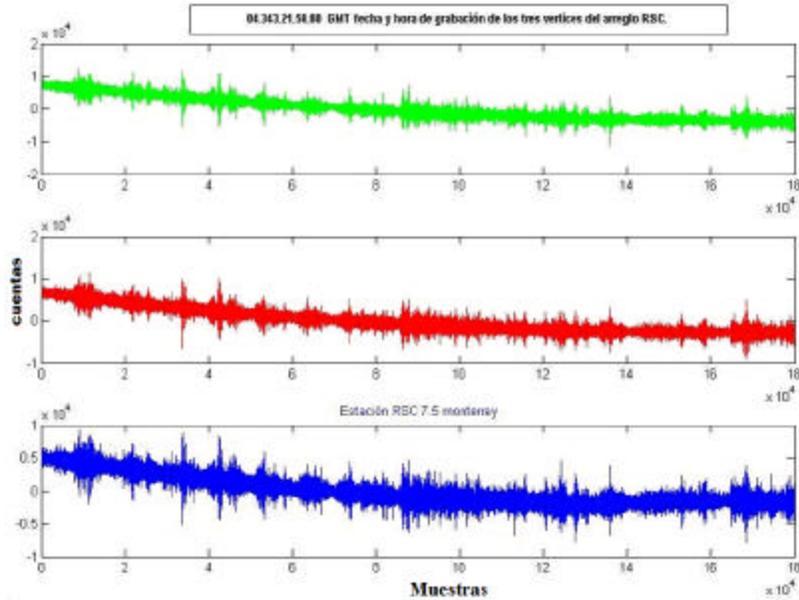


Figura 71. Gráfica de las componentes verticales de los registros para el triangulo RSC de 7.5 m. Las unidades en el eje horizontal están en muestras y en el eje vertical están en cuentas.

Una vez truncadas las señales se seleccionaron 21 ventanas de 81.92 s para después procesarlas, y así obtener la correlación de unidades, los espectros de potencia (figuras 72), coeficiente de correlación y su curva de velocidad de fase. Para cada uno de los vértices.

Para cada una de las 21 ventanas se obtienen los coeficientes de correlación. Para el ejemplo que hemos tomado del arreglo RSC 7.5 m (Río Santa Catarina de 7.5 m de abertura) las correlaciones son mostradas en las Figuras 73 y 74. En cada cuadro aparecen las correlaciones cruzadas normalizadas para las tres direcciones (lo que corresponde a la parte que se encuentra dentro de la integral de la ecuación 4 del punto I.1 de descripción del método SPAC).

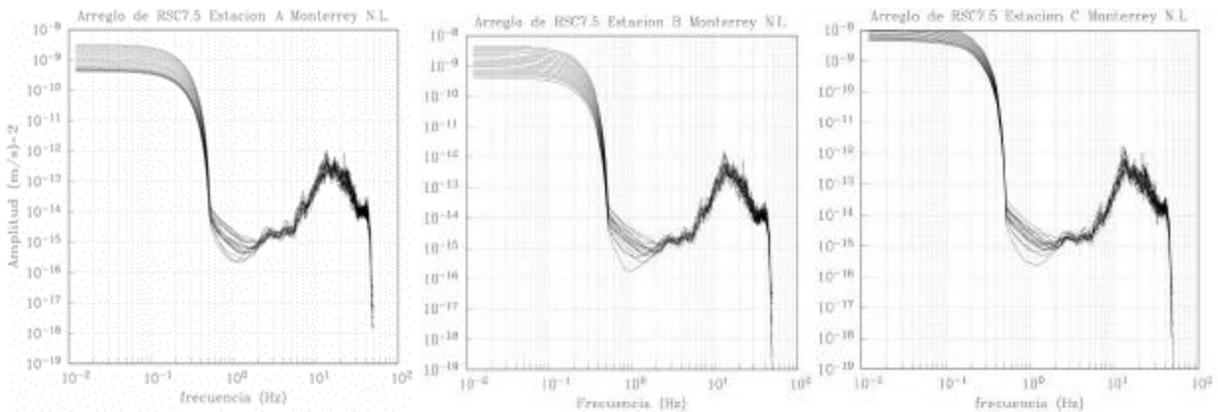


Figura 72. Espectros de potencia de las 16 ventanas seleccionadas de 81.92 s. Para el arreglo de 7.5 m del sitio RSC7.5 de los vértices A, B, C.

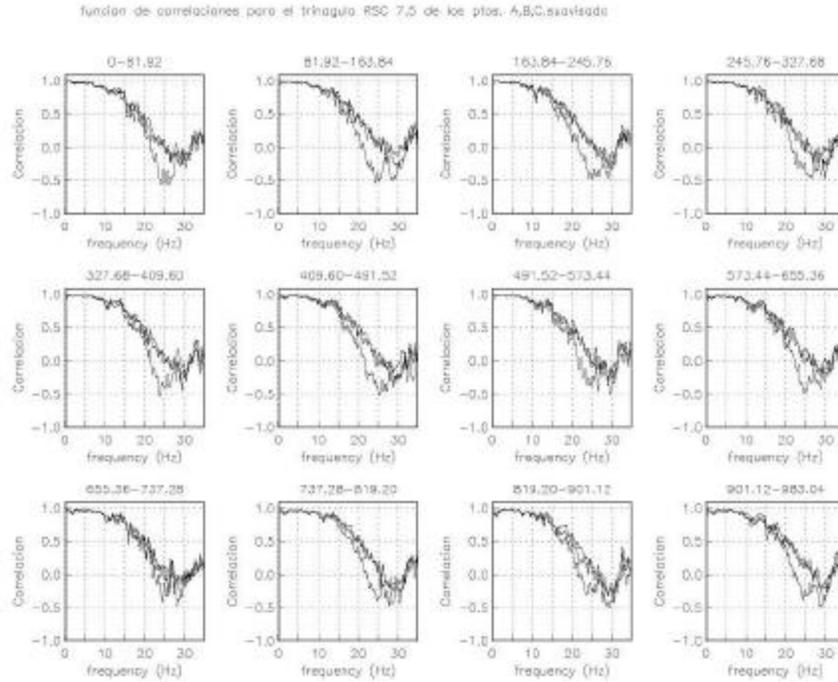


Figura 73. Correlaciones cruzadas calculadas entre las tres estaciones para las primeras 12 ventanas de 81.92 s.

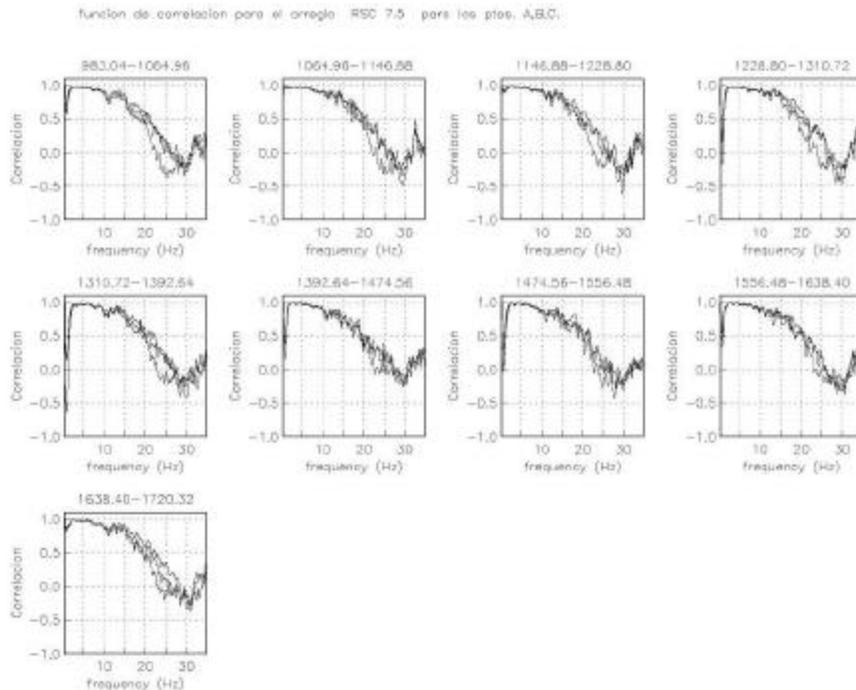


Figura 74. Correlaciones cruzadas calculadas entre las tres estaciones para las 9 ventanas restantes de 81.92 s.

Después de calcular los coeficientes de correlación se seleccionaron todos aquellos que más se parecieran a una función Bessel de orden cero, y cuidando también los cruces por ceros, que estos cruces estuvieran en el mismo rango de frecuencias y seleccionando todas aquellas que mejor tuvieran similitud entre ellas.

Una vez seleccionadas las 16 ventanas se calcula el coeficiente de auto-correlación de las tres estaciones integrando las tres direcciones de todas las ventanas seleccionadas resultando el coeficiente de autocorrelación que se muestra en la figura 75.

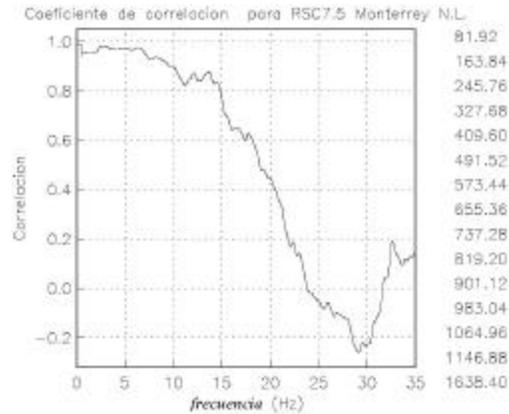


Figura 75. Coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo de 7.5 m de la parte derecha se muestran la lista de las ventanas seleccionadas.

Una vez calculado el coeficiente de auto-correlación, se calculó la curva de dispersión como se muestra en la figura 76, en esta figura solo se grafican las secciones de curvas comprendidas entre líneas rectas que delimitan el abanico de confiabilidad según lo definió Miyakoshi (1995).

En la misma gráfica aparece la curva de dispersión calculada con el modelo calculado que se observa en la parte superior derecha de la misma figura. El modelo calculado fue obtenido por ensayo y error, como se ilustra en la figura 76.

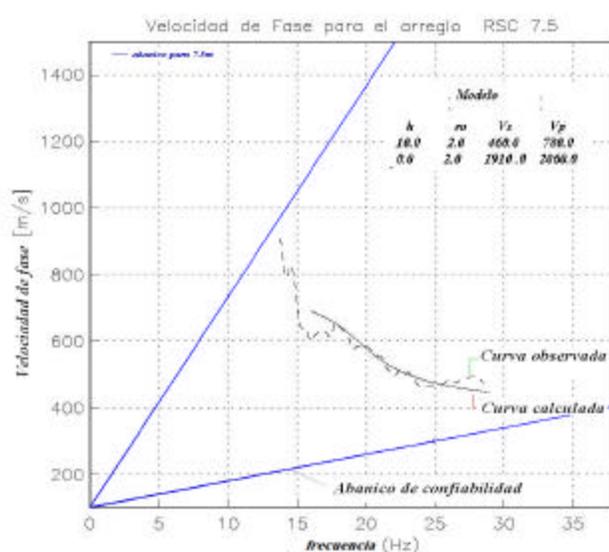


Figura 76. Curva de dispersión calculada (línea continua) y observada (línea punteada), mostrando también con líneas rectas que parten de cero, el abanico de confiabilidad de Miyakoshi (1995).

Para los demás arreglos cabe mencionar que este procedimiento se realizó para cada uno de los arreglos instrumentales de la ciudad de Monterrey. Sin embargo por razones prácticas, a continuación únicamente

se muestran los espectros de potencia como también las correlaciones cruzadas de las ventanas seleccionadas y sus coeficientes de auto-correlación calculados.

XI.1 Resultados obtenidos para el arreglo RSC 15 m.

Para este arreglo se muestran únicamente los espectros de potencia de las ventas seleccionadas como se ilustra en la figura 77.

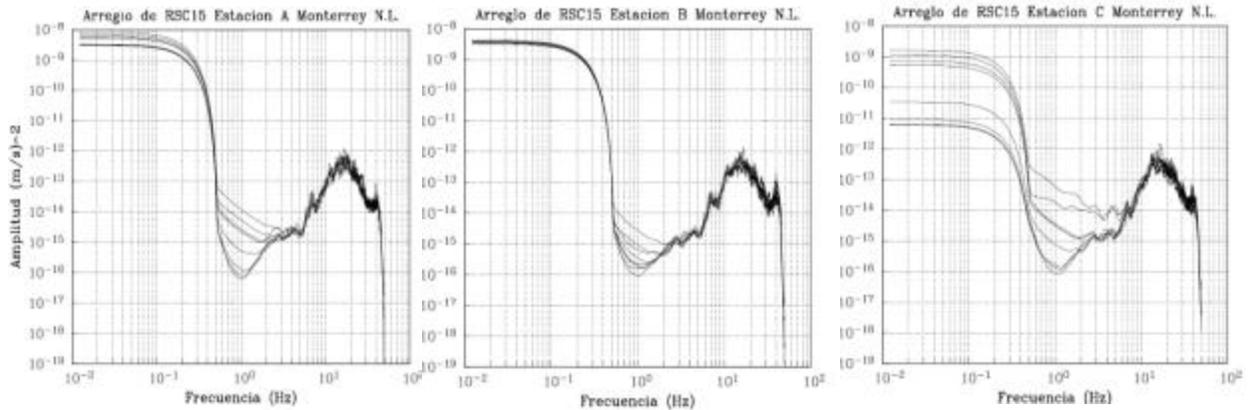


Figura 77. Espectros de potencia de las 16 ventanas seleccionadas de 81.92 s Para el arreglo de 7.5 m del sitio RSC7.5 de los vértices A, B, C.

En cada cuadro aparecen las correlaciones cruzadas normalizadas para las tres direcciones de las ventanas seleccionadas de los tres vértices (ver figura 78).

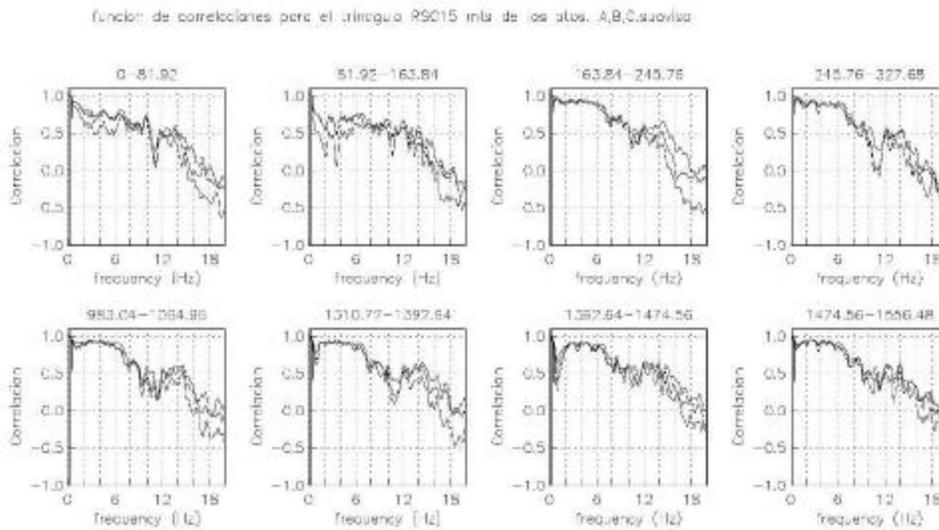


Figura 78. Correlaciones cruzadas seleccionados para el arreglo RSC 15 m.

Una vez seleccionadas las correlaciones cruzadas se calcula el coeficiente de auto-correlación de las tres estaciones integrando en las tres direcciones de todas las ventanas seleccionadas como se presenta en la figura 79.

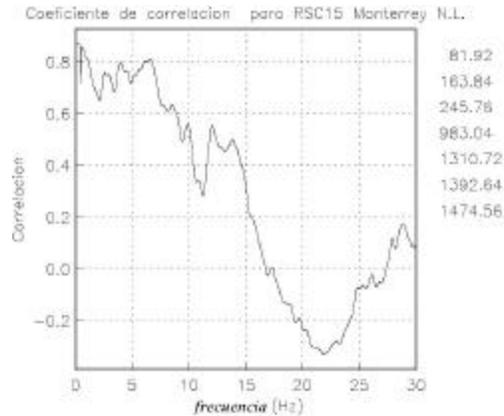


Figura 79. Coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo de 15 m. En la parte derecha se muestra la lista de las ventanas seleccionadas.

Una vez obtenido el coeficiente de auto-correlación se calculó la curva de dispersión como se observó en la figura 80, en esta figura solo se grafica la sección de la curva comprendida entre las líneas rectas que delimitan el abanico de confiabilidad definido por Miyakoshi (1995).

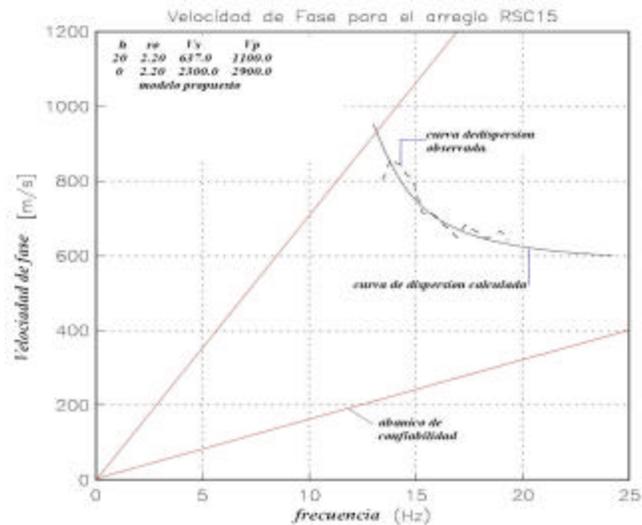


Figura 80. Curva de dispersión calculada (línea continua) y observada (línea punteada), mostrando también con líneas rectas que parten de cero, el abanico de confiabilidad de Miyakoshi (1995).

Una vez, analizados los resultados de los arreglos propuestos. Se ajusta una sola curva de dispersión, para las diferentes curvas de dispersión correspondientes a las diferentes aberturas de 7.5 m y 15 m realizados cerca del lecho del río Santa Catarina. Como se muestra en la figura 81 (Resultados de las curvas de dispersión para el arreglo RSC).

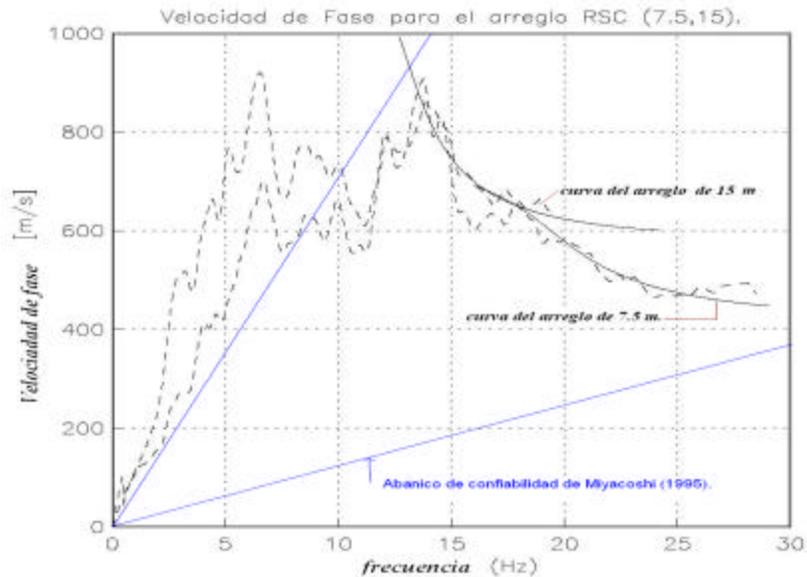


Figura 81. Curvas de dispersión calculadas para las diferentes aberturas de los dos arreglos del sitio RSC el de 7.5 m y el de 15 m (línea punteada) y la curva calculada (línea continua) mostrando también con líneas rectas que parten de cero, el abanico de confiabilidad de Miyakoshi (1995).

Como podemos observar en la figura 81 las curvas de dispersión calculadas para los dos arreglos muestran un comportamiento similar permitiéndonos definir una sola curva de dispersión para los dos arreglos ya que presentan una buena curva descendente en un mismo rango de frecuencias que va desde 14 Hz hasta 30 Hz aproximadamente.

Sobrepuestas las curvas de dispersión de los dos arreglos se calcula la curva de dispersión de ondas Rayleigh para las dos curvas obtenidas de los arreglos de 7.5 m, 15 m mostrados.

Por otro lado cabe mencionar que el análisis se parte de los modelos obtenidos para cada curva (los cuales se calcularon para una capa y un semi espacio).

Partiendo de esos resultados, ahora el modelo calculado se hace para 2 capas y el semi-espacio. Como se muestra en la figura 82 en la que se ve un claro ajuste de la curva de dispersión calculada con respecto a las dos curvas observadas.

X.I.1.a Resultados de la curva de dispersión de los arreglo RSC con el modelo calculado.

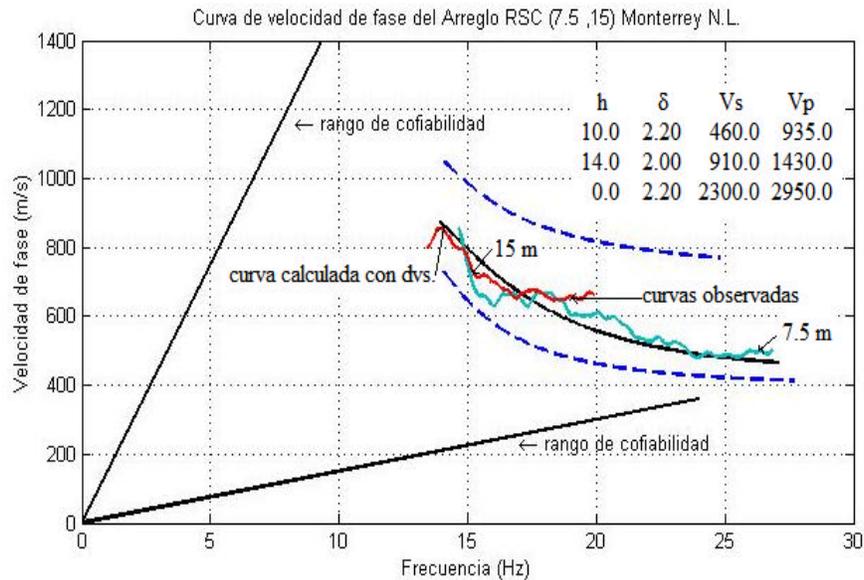


Figura 82. Curvas de dispersión observada para los dos arreglos del sitio RSC (línea continua azul y roja) y la curva calculada (línea continua negra) más su desviación estándar (con líneas punteadas), mostrando en la parte superior derecha el modelo calculado.

Una vez ajustada la curva de dispersión de ondas Rayleigh para dos capas y un semi-espacio en el rango de frecuencias de 14 Hz a 26 Hz, de donde el rango de confiabilidad de estos valores se tiene comprendido dentro del abanico de confiabilidad de Miyacoshi (1995) como se muestra en la figura 82.

X.1.b. Estructuras de velocidades del arreglo RSC determinado con un modelo de dos capas y un semi-espacio.

Con el modelo obtenido del ajuste de la curva de dispersión más su desviación estándar, se procedió a invertir dicho modelo para determinar la estructura de velocidades para este sitio considerando su desviación estándar como se presenta en la siguiente figura (ver figura 83). Mostrando clara mente la estructura de velocidades para ondas P y para ondas S más menos su desviación estándar.

En la cual, se pueden apreciar las dos capas calculadas y el semi-espacio para los dos tipos de ondas calculadas. Ambas estructuras con una profundidad de exploración de aproximadamente de 24 m.

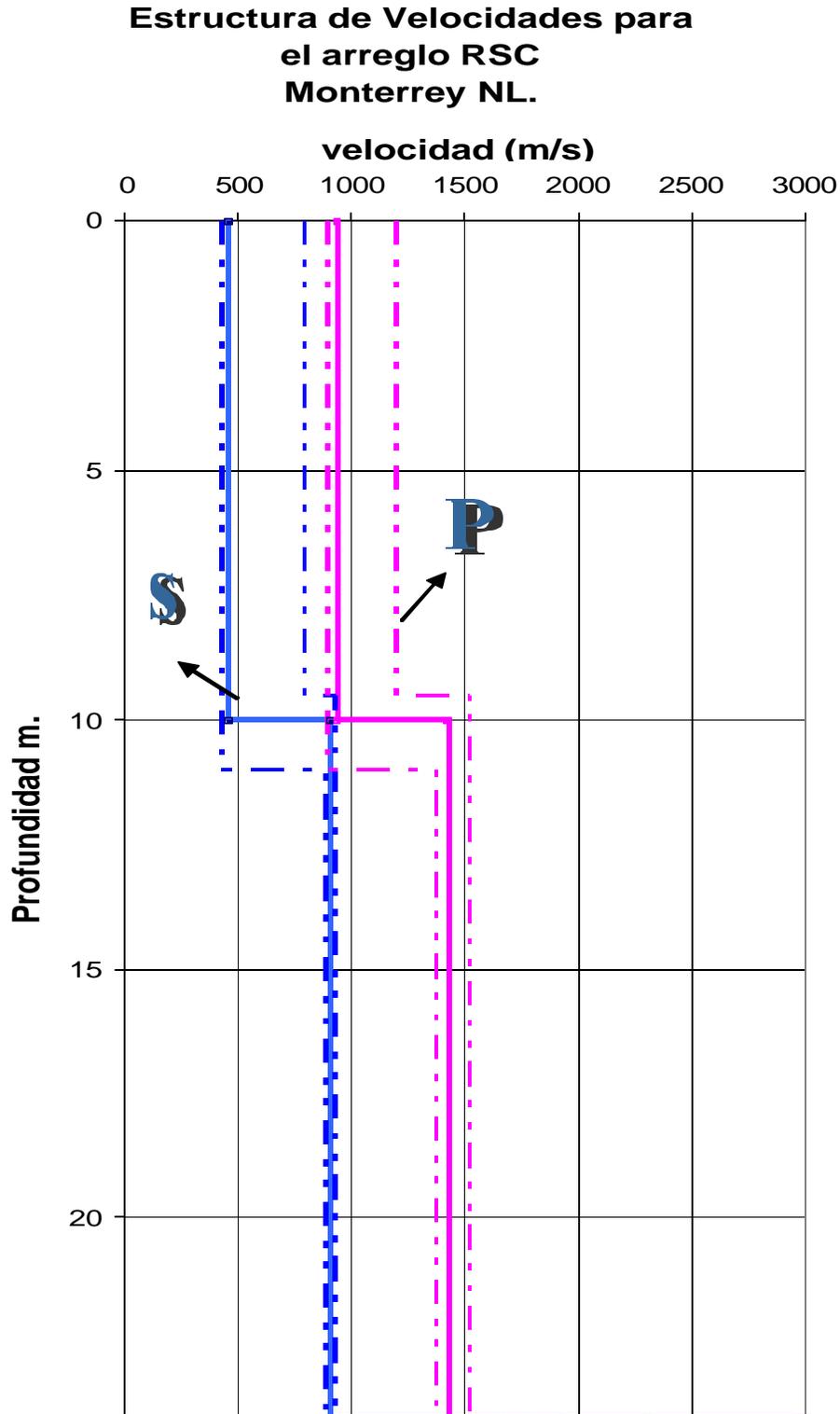


Figura 83. Estructura de velocidades calculadas para los tres vértices ABC de los dos arreglos del sitio RSC mostrando velocidad de ondas P (línea continua), velocidad de ondas S (línea continua) y sus desviaciones estándar (con líneas discontinuas). Mostrando en el eje vertical los valores en metros y en el eje horizontal en m/s.

Todo este procedimiento se realizó para los demás arreglos en los diferentes sitios de Monterrey. A continuación se muestran únicamente las correlaciones cruzadas, los coeficientes de autocorrelación, las curvas de dispersión y las estructuras de velocidades resultantes de las inversiones de los modelos calculados de la curva de dispersión.

XII. ARREGLOS REALIZADOS EN EL SITIO LLAMADO PREDIO DE LOS CUATRO VIENTOS (PL4V).

Para este sitio iniciaremos del arreglo más grande hasta el más pequeño mostrando solamente los resultados de las ventanas seleccionadas en cada arreglo.

XII.1 arreglo PL4V 280 m.

En este arreglo se muestran los espectros de potencia de las ventanas seleccionadas calculados para este arreglo de 280 m. figura 84.

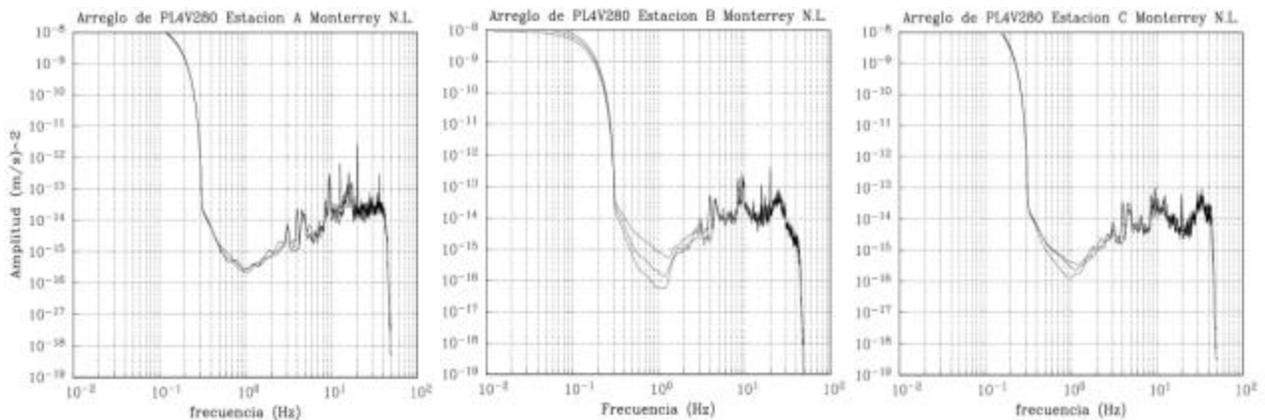


Figura 84. Espectros de potencia de las 3 ventanas seleccionadas de 81.92 s. Para el arreglo de 280m del sitio PL4V280 de los vértices A, B, C.

Los espectros de potencia presentan dispersión en los tres vértices (A, B, C), esto se debe a las fuentes locales del lugar. Para el análisis de este sitio se utilizó un suavizado de 0.3 Hz.

Para este arreglo de 280 m se muestran las correlaciones cruzadas seleccionadas en las que en cada cuadro aparecen las correlaciones cruzadas normalizadas para las tres direcciones de las ventanas seleccionadas de los tres vértices (ver figura 85).

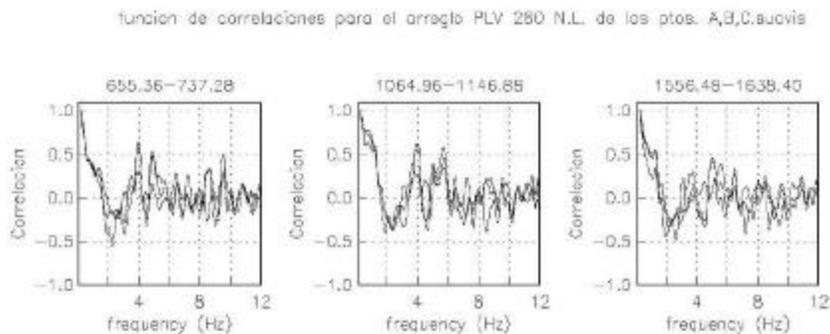


Figura 85. Correlaciones cruzadas seleccionados para el arreglo PL4V280 m.

Una vez calculadas las correlaciones cruzadas se calcula el coeficiente de auto-correlación de las tres estaciones de todas las ventanas seleccionadas como se muestra en la figura 86.

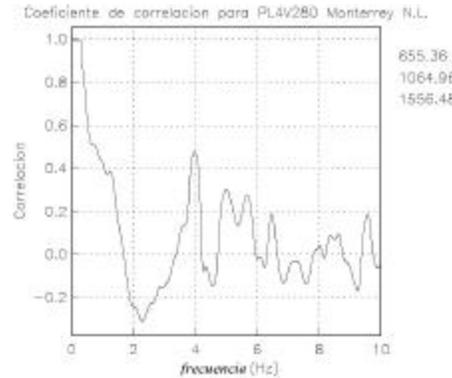


Figura 86. Coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo de 280 de la parte derecha se muestra la lista de las ventanas seleccionadas.

Una vez obtenido el coeficiente de auto-correlación se calculó la curva de dispersión como se muestra en la figura 87, en esta figura solo se grafica la sección de la curva comprendida entre las líneas rectas que delimitan el abanico de confiabilidad según lo definió Miyakoshi (1995).

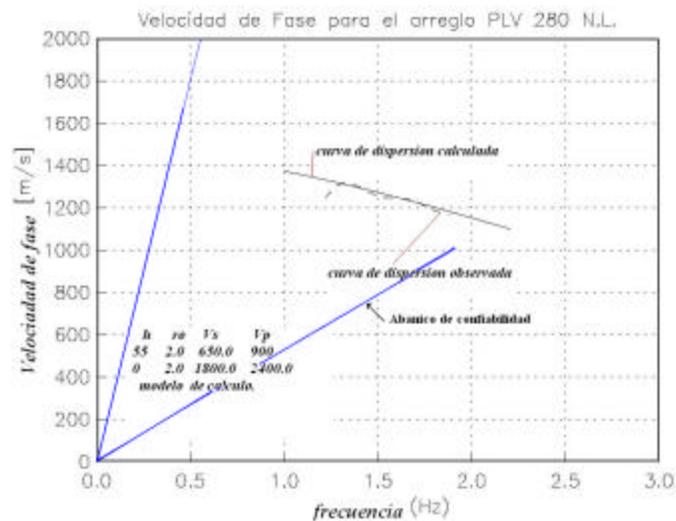


Figura 87. Curva de dispersión calculada (línea continua) y observada (línea punteada), para el arreglo de 280m del sitio PLAV. Mostrando también con líneas rectas que parten de cero, el abanico de confiabilidad de Miyakoshi (1995).

En la misma grafica, aparece la curva de dispersión calculada, la cual fue obtenida por ensayo y error, a partir del modelo inicial propuesto.

Para este arreglo como se muestra en la figura 87 se ajusto la curva de dispersión en el rango de frecuencias entre 1.0 y 2.0 Hz.

XII.2 ARREGLO PL4V 150 m.

Para este arreglo se seccionaron siete ventanas, de las cuales en la siguiente figura 88 se muestran los espectros de potencia mostrándose una dispersión similar en los tres vértices.

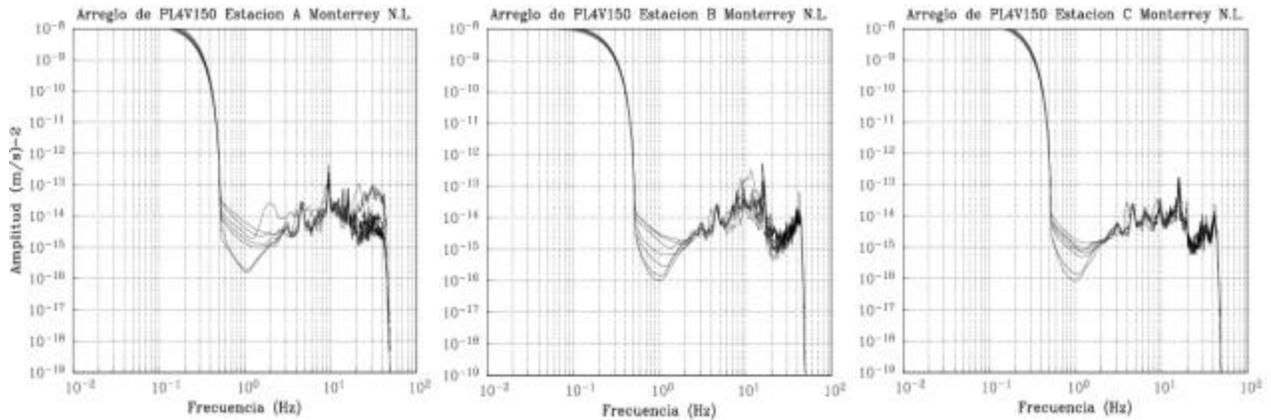


Figura 88. Espectros de potencia de las 7 ventanas seleccionadas de 81.92 s para el arreglo de 150 m del sitio PL4V150 de los vértices A, B, C

Calculados los espectros de potencia se calcularon las correlaciones cruzadas (ver figura 89) mostrando en cada cuadro aparecen las correlaciones cruzadas normalizadas para las tres direcciones de las ventanas seleccionadas de los tres vértices (Cada ventana de 81.92 s).

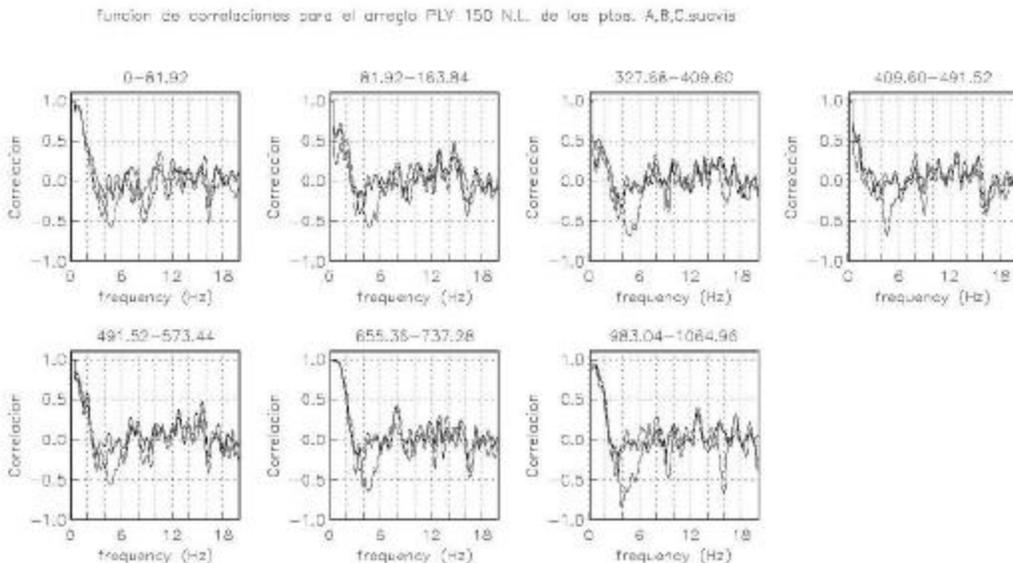


Figura 89. Correlaciones cruzadas seleccionados para el arreglo PL4V150 m.

Calculadas las correlaciones cruzadas se calcula el coeficiente de auto-correlación de las tres estaciones integrando las tres direcciones de todas las ventanas seleccionadas resultando el coeficiente de autocorrelación que se muestra en la figura 90.

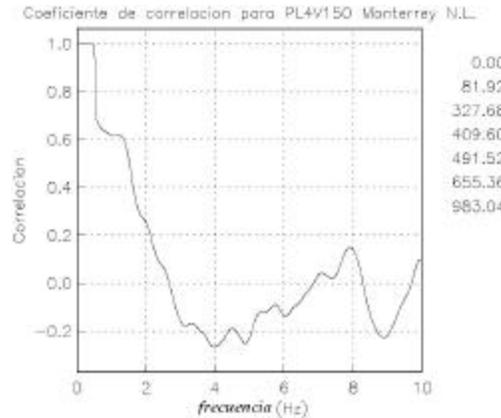


Figura 90. Coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo de 280 m de la parte derecha se muestra la lista de las ventanas seleccionadas.

Una vez obtenido el coeficiente de auto-correlación se calculó la curva de dispersión como se muestra en la figura 91, en esta figura solo se grafica la sección de la curva comprendida entre las líneas rectas que delimitan el abanico de confiabilidad según lo definió Miyakoshi (1995).

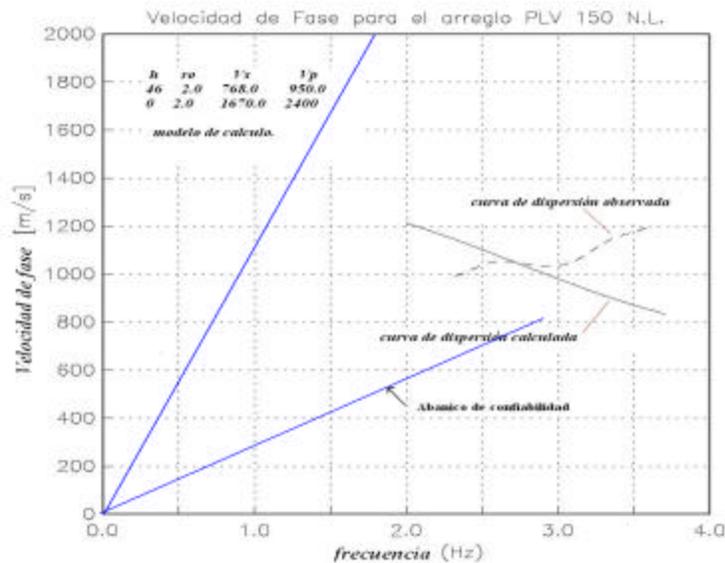


Figura 91. Curva de dispersión calculada (línea continua) y observada (línea punteada), mostrando también con líneas rectas que parten de cero, el abanico de confiabilidad de Miyakoshi (1995).

Para este arreglo, se estimó para una pequeña curva de dispersión comprendida en el rango de 2.5 y 3.0 Hz utilizando un modelo de una capa y un semi-especio.

XII.3 Arreglo PL 4V 50 m.

Para este arreglo, en especial se seleccionaron los espectros de potencia de las 21 ventanas de 81.92 s como se observa en la figura 92 mostrando una similitud entre los tres vértices los espectros de potencia de este arreglo.

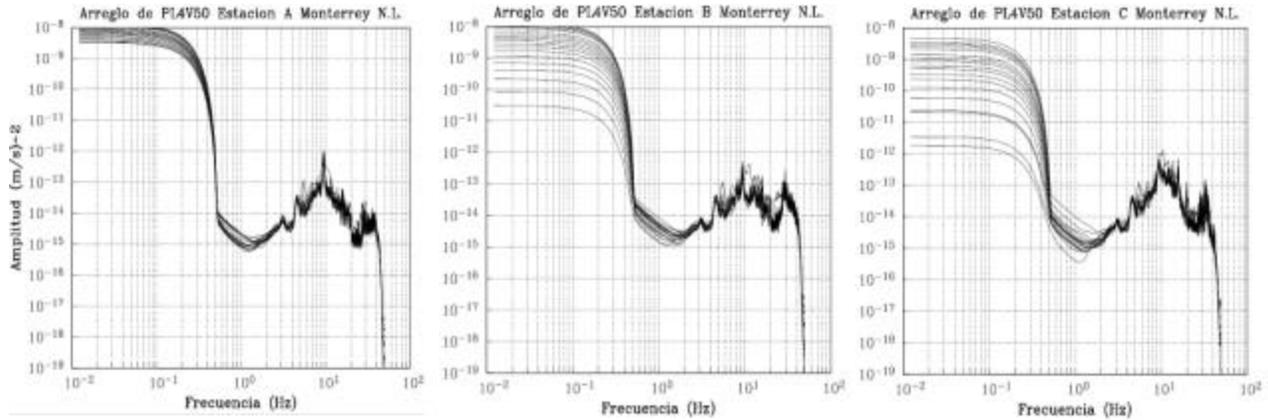


Figura 92. Espectros de potencia de las 18 ventanas seleccionadas de 81.92 s. Para el arreglo de 50 m del sitio PLAV50 de los vértices A, B, C

Para las figuras 93 y 94 se muestran en las 21 correlaciones cruzadas normalizadas entre los tres vértices y para las tres direcciones.

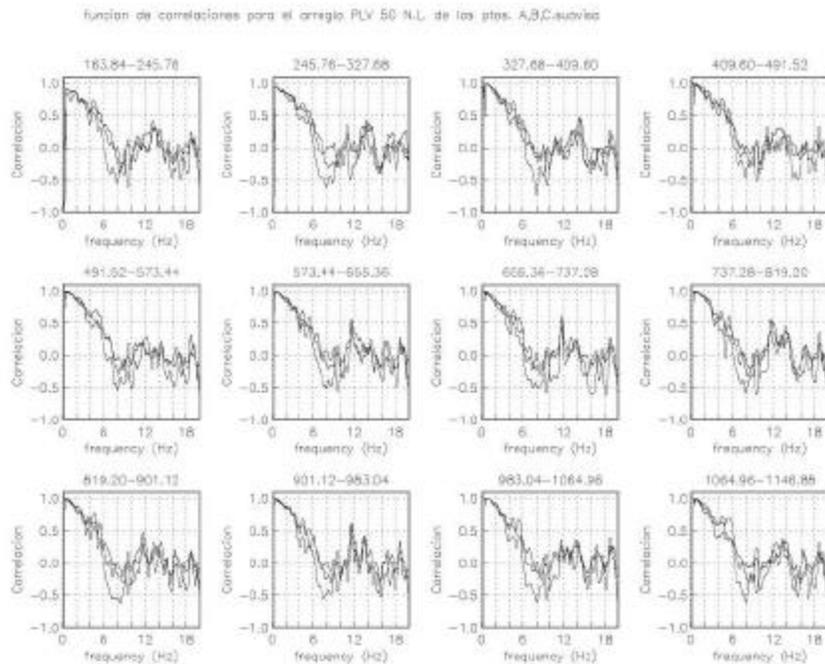


Figura 93. Correlaciones cruzadas seleccionados para el arreglo PLAV50 m.

En las 21 ventanas de 81.92 s se tomaron todas las correlaciones cruzadas obtenidas para este arreglo. No se desecharon ventanas, ya que para este caso debido a que el rango de frecuencias de exploración es hacia frecuencias relativamente altas. Y por otro lado presentaron buena similitud las correlaciones cruzadas calculadas de los tres vértices (ver figura 94).

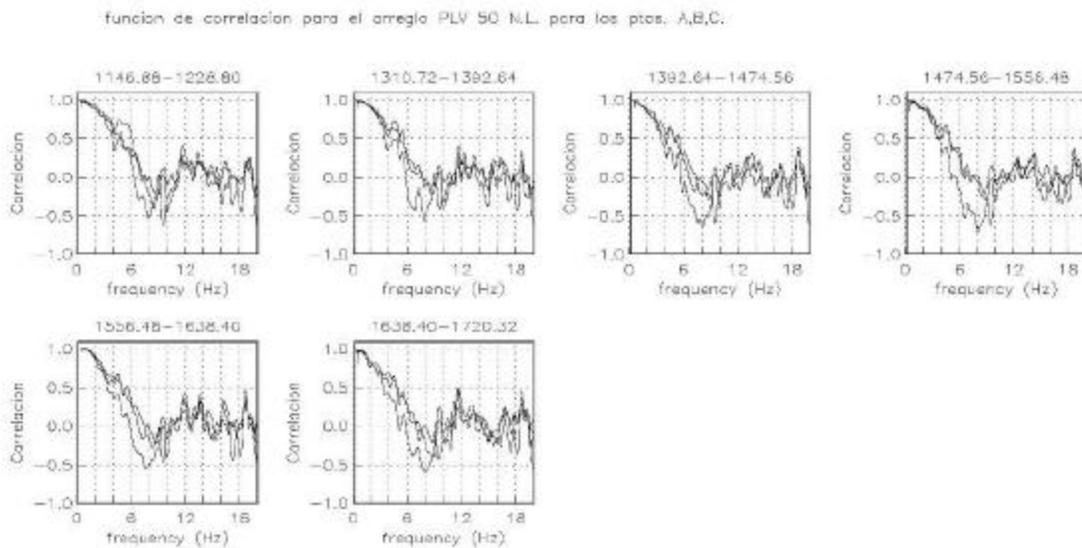


Figura 94. Cross-correlacione seleccionados para el arreglo PLAV50 m.

Calculadas las correlaciones cruzadas se calculó el coeficiente de auto-correlación de las tres estaciones integrando las tres direcciones de todas las ventanas seleccionadas como se muestra en la figura 95.



Figura 95. Coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo de 50 m. En la parte derecha se muestra la lista de las ventanas seleccionadas.

Una vez obtenido el coeficiente de auto-correlación se calculó la curva de dispersión como se muestra en la figura 96, en esta figura solo se grafica la sección de la curva comprendida entre las líneas rectas que delimitan el abanico de confiabilidad según lo definió Miyacoshi (1995).

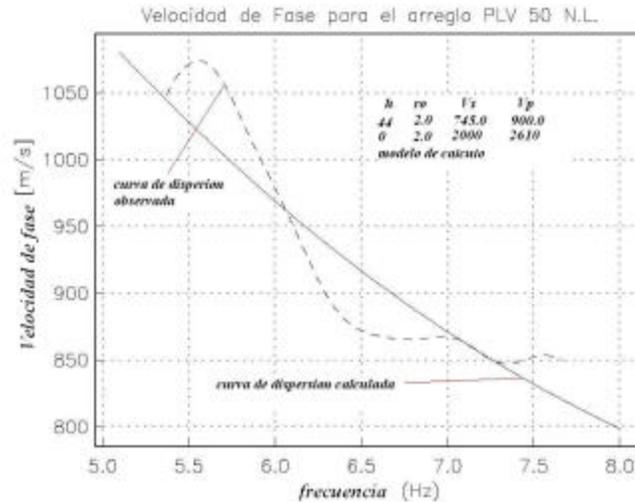


Figura 96. Curva de dispersión calculada (línea continua) y observada (línea punteada), mostrando en la parte superior derecha el modelo utilizado.

XII.4 Arreglo PL4V 15 m.

En este arreglo de 15 m de abertura se presentan los espectros de potencia en la figura 97 teniendo estos espectros una buena similitud entre los tres vértices en frecuencias altas.

Aunque presentaron poca dispersión en el rango de frecuencias de 0.3 a 3.0 Hz, se observa que tienen una amplitud muy similar entre los tres vértices.

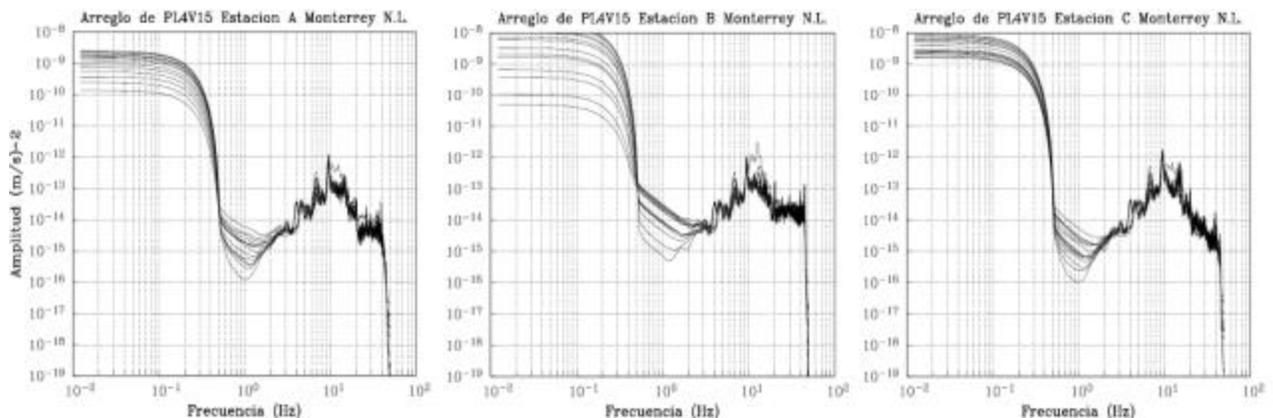


Figura 97. Espectros de potencia de las 14 ventanas seleccionadas de 81.92 s. Para el arreglo de 50 m del sitio PL4V50 de los vértices A, B, C.

Una vez calculados los espectros de potencia, se calculó las correlaciones cruzadas entre las tres estaciones mostrando en cada cuadro las correlaciones cruzadas normalizadas para las tres direcciones de las ventanas seleccionadas en los tres vértices. Como se ilustra en las figuras 98 y 99.

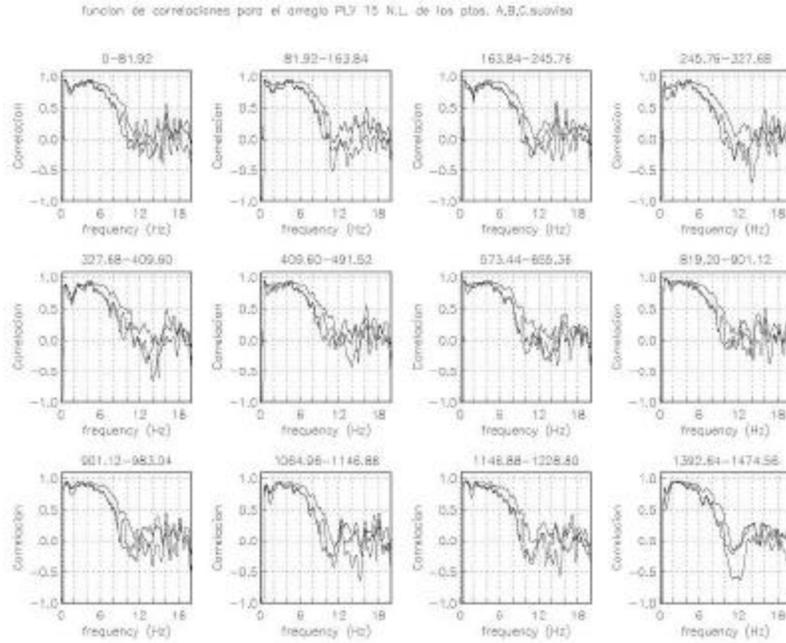


Figura 98. Correlaciones cruzadas seleccionados para el arreglo PL4V 15 m.

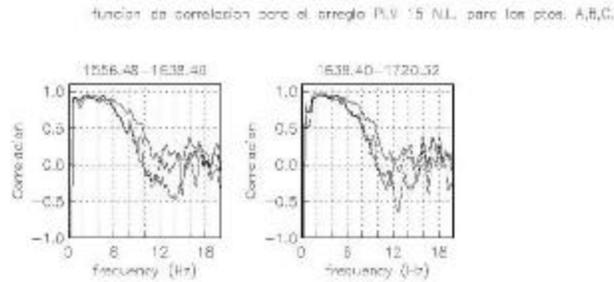


Figura 99. Correlaciones cruzadas seleccionados para el arreglo PL4V 15 m.

Una vez, seleccionadas las cross-correlaciones. Se calculó el coeficiente de auto-correlación de las tres estaciones, integrando en las tres direcciones. Como se observa en la figura 100.

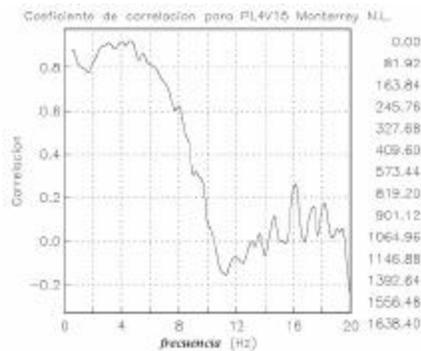


Figura 100. Coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo de 15m en la parte derecha se muestra la lista de las ventanas seleccionadas.

Calculado el coeficiente de correlación se calculó la curva de dispersión como se muestra en la figura 101. En esta figura se ilustra únicamente la curva calculada y la curva observada debido a que el abanico de confiabilidad no se aprecia por la escala de la figura.

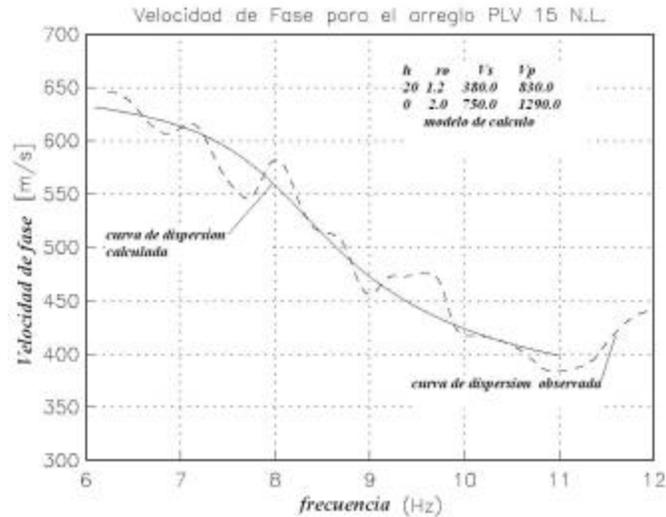


Figura 101. Curva de dispersión observada para el arreglo de 15m (línea punteada) y la curva calculada (línea continua). Mostrando el modelo utilizado en la parte superior derecha.

Para este arreglo se ajusto la curva de dispersión para un rango de frecuencias relativamente altas entre 6.0 y 11 Hz.

Una vez, analizados los resultados de los arreglos propuestos. Se ajusta una sola curva de dispersión, para las curvas obtenidas para cada arreglo. Como se muestra en la figura 102.

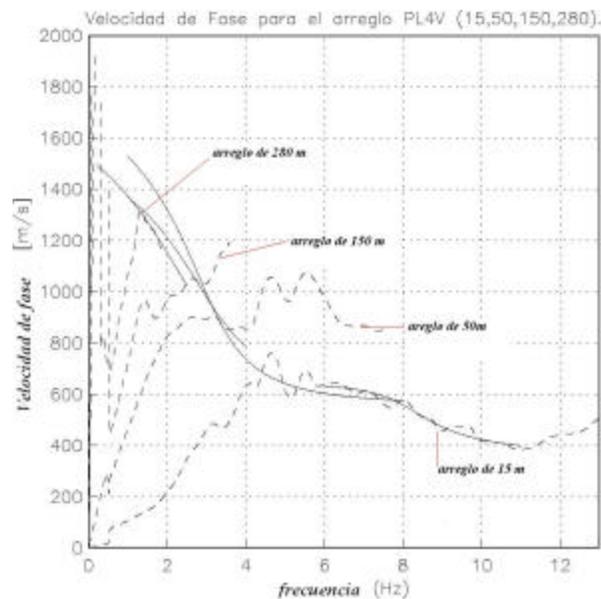


Figura 102. Curvas de dispersión observada para los cuatro arreglos del sitio PL4V de 280 m, 150 m, 50 m y 15m mostrando la curva observada (línea punteada) y la curva calculada (línea continua).

En la figura 103 se aprecia que a medida que se van reduciendo las distancias en los arreglos, el rango de frecuencia se mueve hacia frecuencias altas y viceversa, entre mayor abertura se tenga en el arreglo el análisis se va realizando hacia mas bajas frecuencias.

Después de sobreponer las curvas de dispersión de todos los arreglos se calcula la curva de dispersión de ondas Rayleigh para las 4 curvas obtenidas como se muestra en la figura 104(para los arreglos de 280, 150,50m y 15m.).

Iniciando el análisis a partir un modelo equivalente obtenido a partir de los resultados de cada arreglo (los cuales se calcularon para una capa y un semi espacio). Obteniendo así modelo de 4 capas y un semi espacio. Como se muestra en la figura 103

XII.5 Resultados de la curva de dispersión de los arreglo PL4V con el modelo calculado.

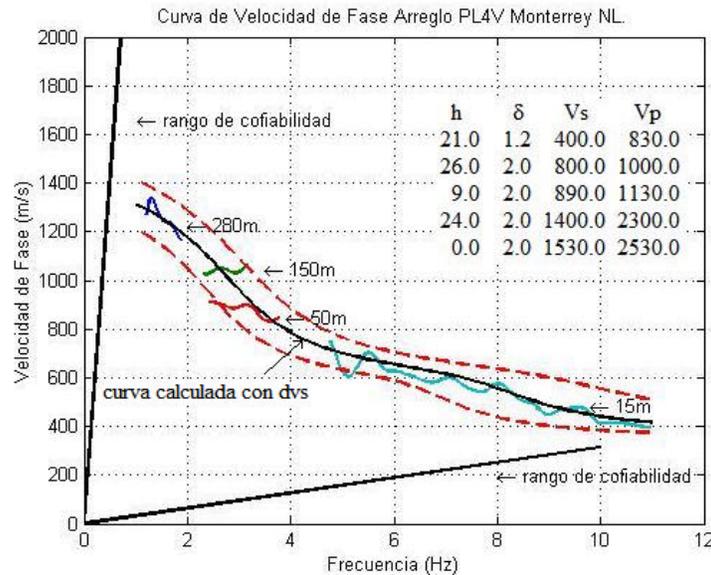


Figura 103. Curva de dispersión observada para los cuatro arreglos del sitio PL4V de 280 m, 150 m, 50 m y 15 m mostrando segmentos de la curva observada (línea continua), la curva calculada (con línea negra continua) y su desviación estándar con líneas punteadas. En la parte superior derecha muestra el modelo utilizado.

Ajustada la curva de dispersión de ondas Rayleigh para los cuatro se procedió a invertir el modelo calculado, para obtener la estructura de velocidades de este sitio como se muestra en la figura 104.

En este sitio se llegó a una profundidad de exploración de 80 m de profundidad utilizando el modelo calculado a partir de prueba y error, obteniendo como resultado una estructura de velocidades para ondas P y ondas S para cuatro capas.

XII.6. Estructuras de velocidades del arreglo de los cuatro vientos determinado con un modelo de cuatro capas y un semi-espacio.

Una vez realizado el análisis de los cuatro arreglos y de ajustar la curva de dispersión para dichos arreglos se obtuvo el modelo para invertir la estructura de velocidades. Los resultados obtenidos permitieron definir la estructura de velocidades para este sitio con un modelo de cuatro capas y un semi-espacio como se muestra en la figura 104. Definiendo dos estructuras de velocidades una para ondas S y otra para ondas P, de las cuales se puede apreciar claramente los cambios de fase en las dos estructuras obtenidas mostrando un comportamiento muy similar entre ellas.

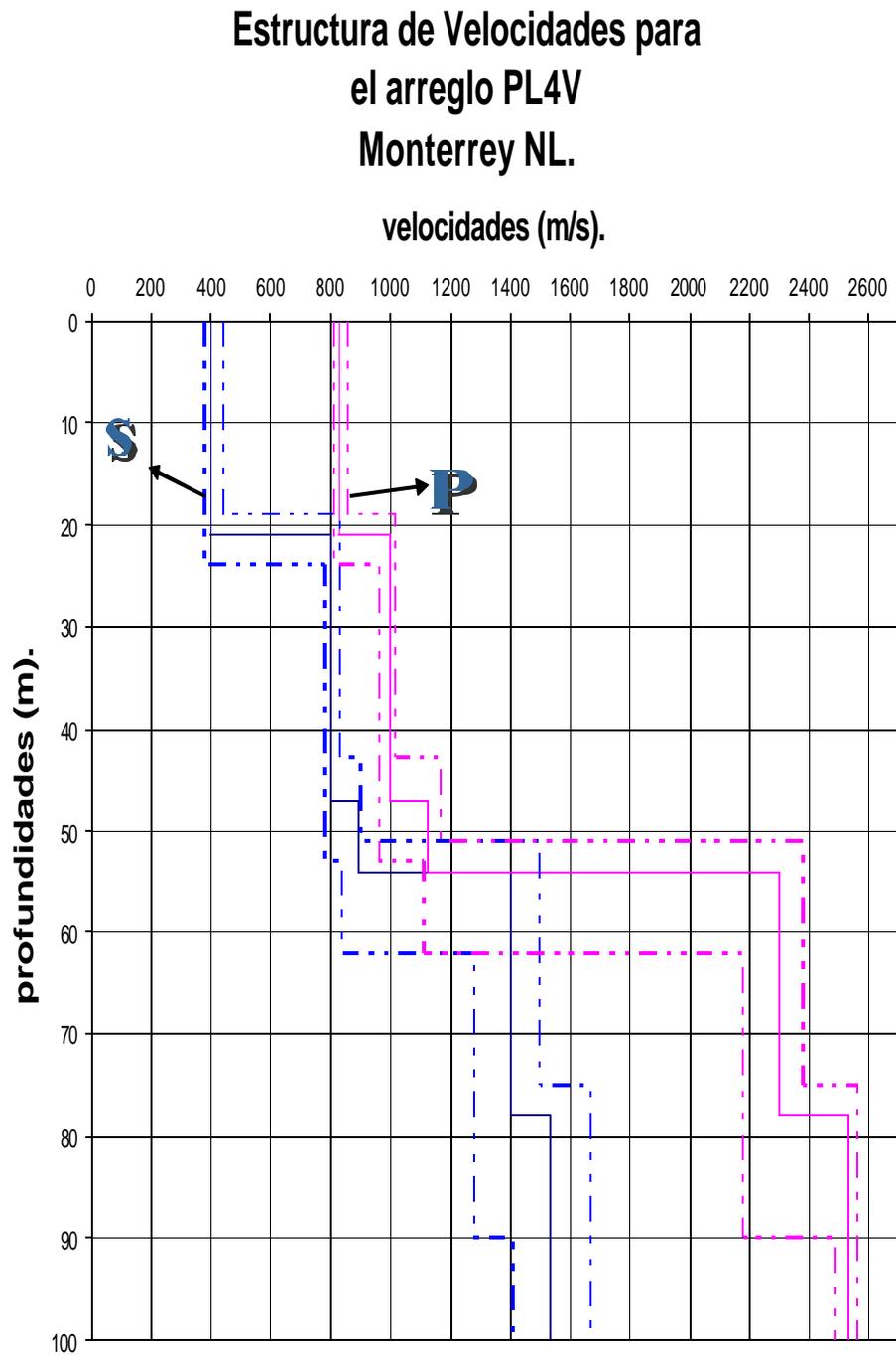


Figura 104. Estructura de velocidades calculadas para los tres vértices ABC de los dos arreglos de PL4V mostrando velocidad de ondas P (línea punteada) y velocidad de ondas S (línea continua).

XIII. ARREGLOS REALIZADOS EN LA COLONIA ROMA (RM).

En este sitio se realizaron arreglos con aberturas de 27, 50, y 150 m del cual iniciaremos primero con el arreglo más grande hasta el más pequeño.

XIII.1 arreglo RM150 m.

Para este arreglo se calcularon los espectros de potencia de las 4 ventanas seleccionadas de los tres vértices como se muestran en la figura 105.

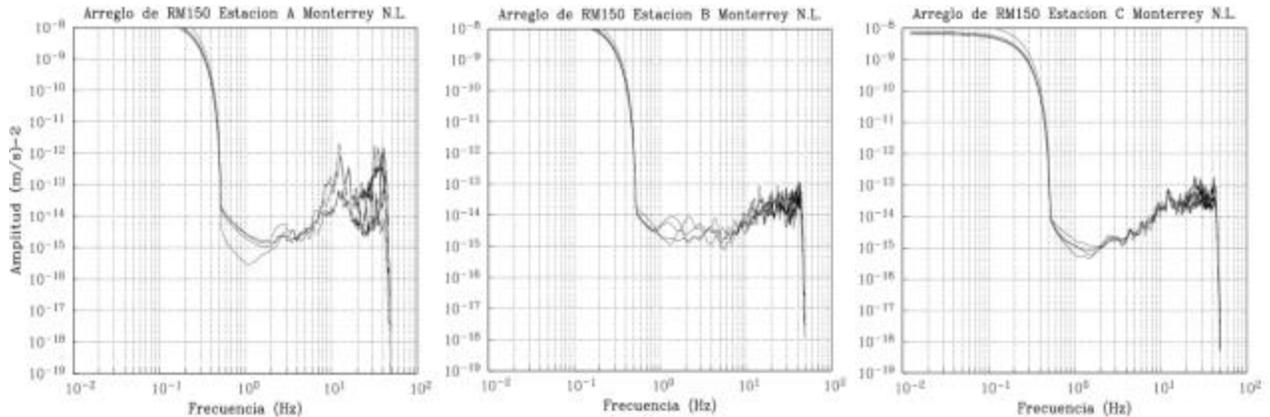


Figura 105. Espectros de potencia de las 4 ventanas seleccionadas de 81.92 s para el arreglo de 50 m del sitio RM150 de los vértices A, B, C.

En los espectros de potencia para los vértices B y C muestran una amplitud muy similar, el vértice B tiene dispersión en frecuencias relativamente bajas (1 a 6 Hz). Mientras que el vértice A presenta amplitudes mayores que los otros dos vértices, y teniendo un comportamiento mas estable en el rango de frecuencias de 2 a 7 Hz al igual que el vértice C.

Una vez calculados los espectros de potencia se calcularon las correlaciones cruzadas normalizadas para las tres direcciones de las ventanas seleccionadas en los tres vértices, como se muestra en la figura 106.

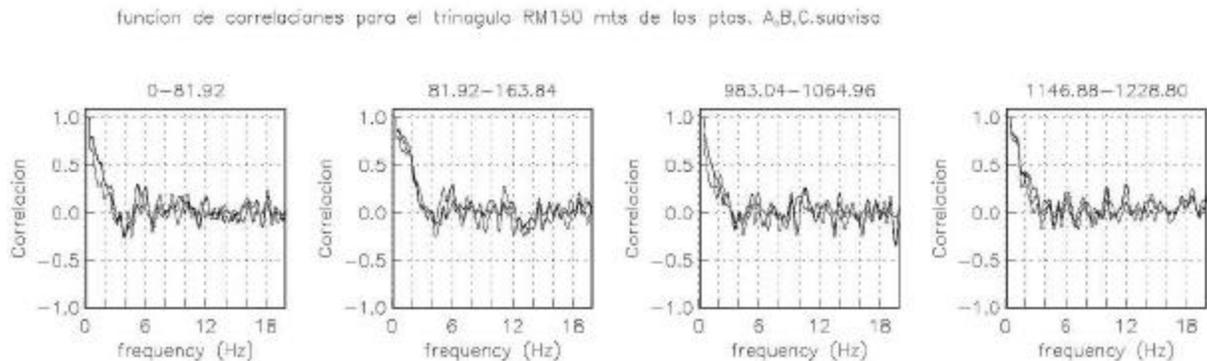


Figura 106. Correlaciones cruzadas seleccionados para 4 ventanas del arreglo RM150.

Una vez, calculadas las correlaciones cruzadas normalizadas se calcula el coeficiente de auto-correlación de las tres estaciones como se muestra en la figura 107.

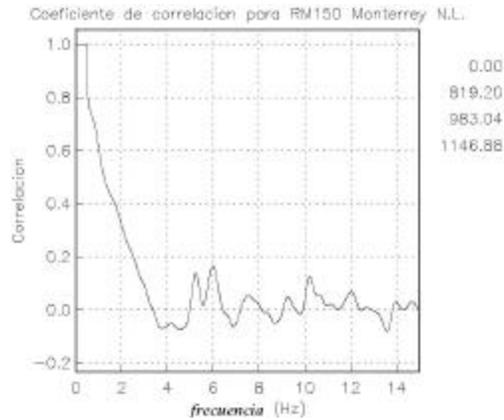


Figura 107. Coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo de 150 m de la parte derecha se muestra la lista de las ventanas seleccionadas.

Calculado el coeficiente de auto-correlación se calcula la curva de dispersión como se ilustra en la figura 108. Esperando obtener una curva de dispersión que sea una curva decreciente lo que para este caso no se obtuvo.

La curva de dispersión obtenida tenemos que es una curva muy pequeña y no proporciona información suficiente para determinar la capa. Lo que para en este caso nos apoyaremos en los resultados de los demás arreglos.

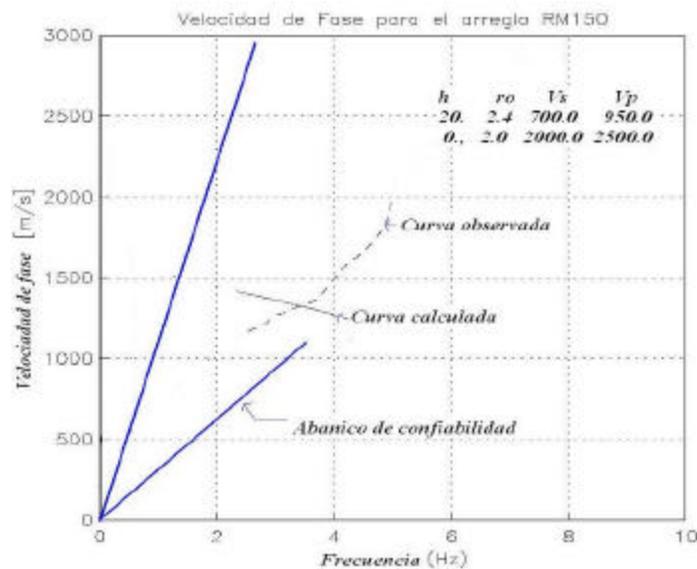


Figura 108. Curva de dispersión calculada (línea continua) y observada (línea punteada), mostrando también con líneas rectas que parten de cero, el abanico de confiabilidad de Miyakoshi (1995).

XIII.2 arreglo RM50 m.

Para este arreglo se calcularon los espectros de potencia de las 7 ventanas seleccionadas de los tres vértices como se muestran en la figura 109.

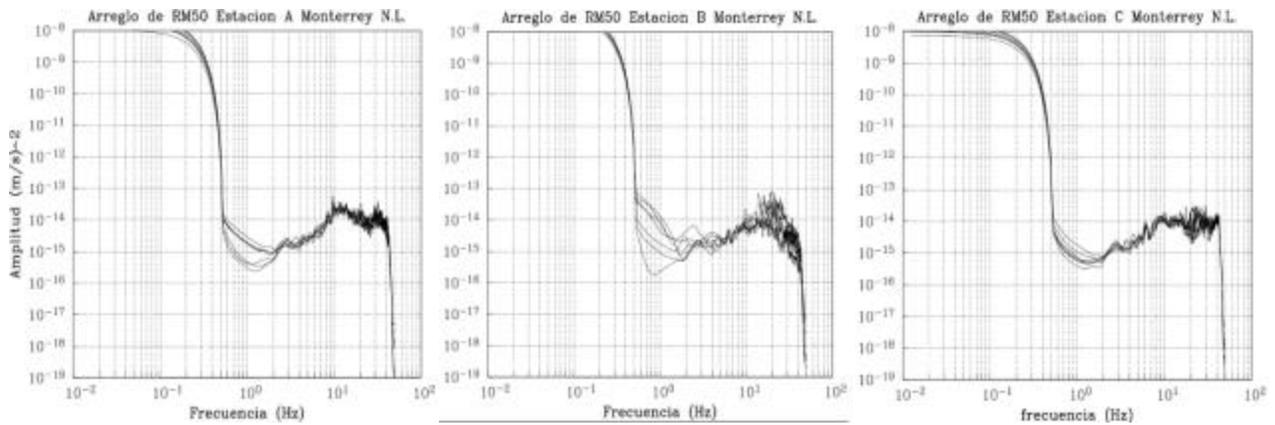


Figura 109. Espectros de potencia de las 7 ventanas seleccionadas de 81.92 s para el arreglo de 50 m del sitio RM50 de los vértices A, B, C.

Los espectros del vértice A y C muestran un rango de amplitud semejante, aunque tienen poca dispersión en el rango de frecuencias relativamente bajas (0.5 a 2.0 Hz) mientras que el vértice B en algunos de sus espectros tiene un pequeño pico en la frecuencia de 20 Hz por otro lado se observa dispersión en el rango de frecuencias de 0.5 a 3.0 Hz.

Para nuestro caso de interés las dispersiones no afectan mucho debido a que el rango de frecuencias que se estudia para este arreglo es entre 6 y 8 Hz y los espectros en esas frecuencias se comportan de manera más estable.

Una vez calculados los espectros de potencia se calcularon las correlaciones cruzadas normalizadas de los tres vértices, como se muestra en la figura 110.

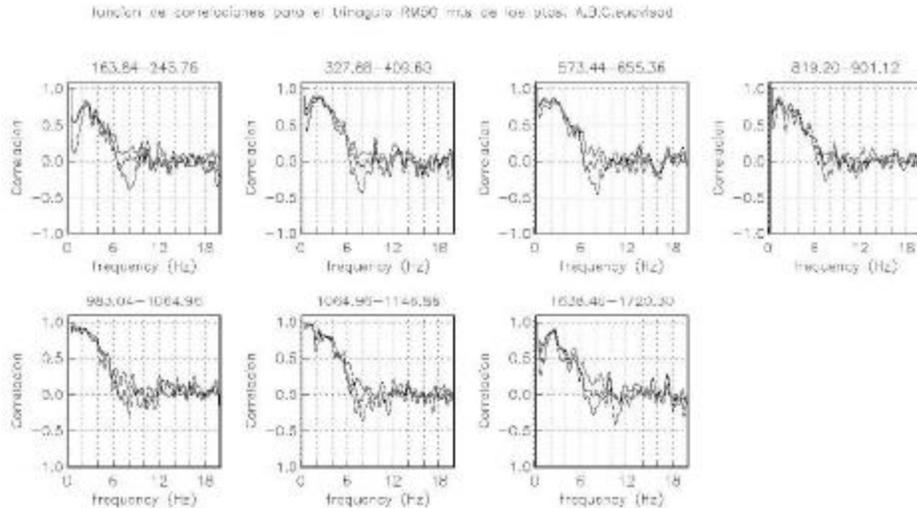


Figura 110. Correlación cruzada seleccionados para el arreglo RM 50 m.

Calculadas las cross correlaciones se calculo el coeficiente de auto-correlación de las tres estaciones integrando en las tres direcciones como se muestra en la figura 111.

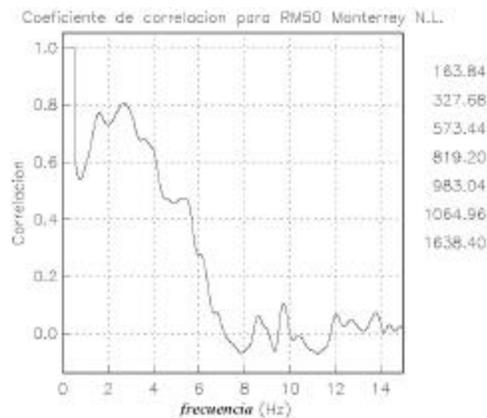


Figura 111. Coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo de 50 m mostrando en la parte derecha la lista de las ventanas seleccionadas.

Calculado el coeficiente de auto-correlación se calcula la curva de dispersión como se ilustra en la figura 112. Esperando encontrar una curva de dispersión que sea una curva decreciente lo que para este caso se analizo en el rango de 6 y 7 Hz.

El modelo que se utilizo para ajustar la curva de dispersión para este arreglo se obtuvo mediante prueba y error hasta obtener un buen ajuste.

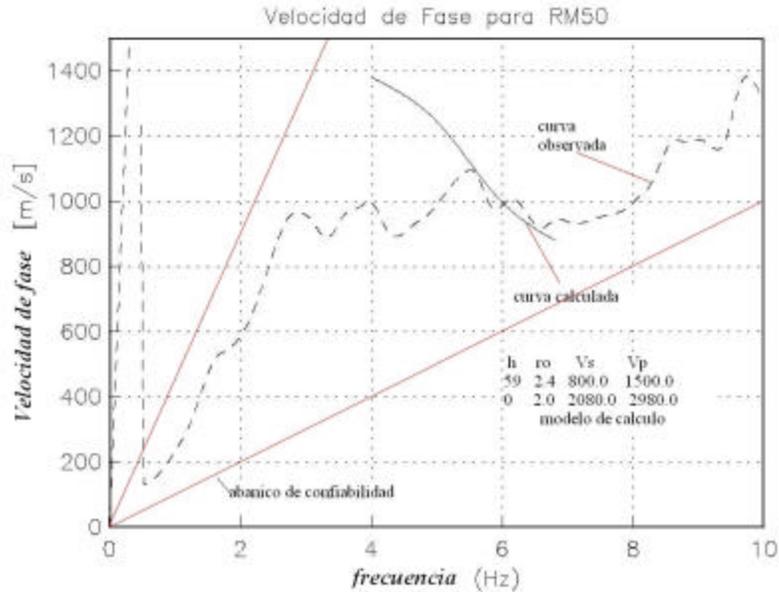


Figura 112. Curva de dispersión observada (línea punteada) y la curva calculada (línea continua), mostrando también con líneas rectas que parten de cero, el abanico de confiabilidad de Miyacoshi (1995).

XIII.3 Arreglo RM 27 m.

Para este arreglo se calcularon los espectros de potencia de las 6 ventanas seleccionadas de los tres vértices como se muestran en la figura 113.

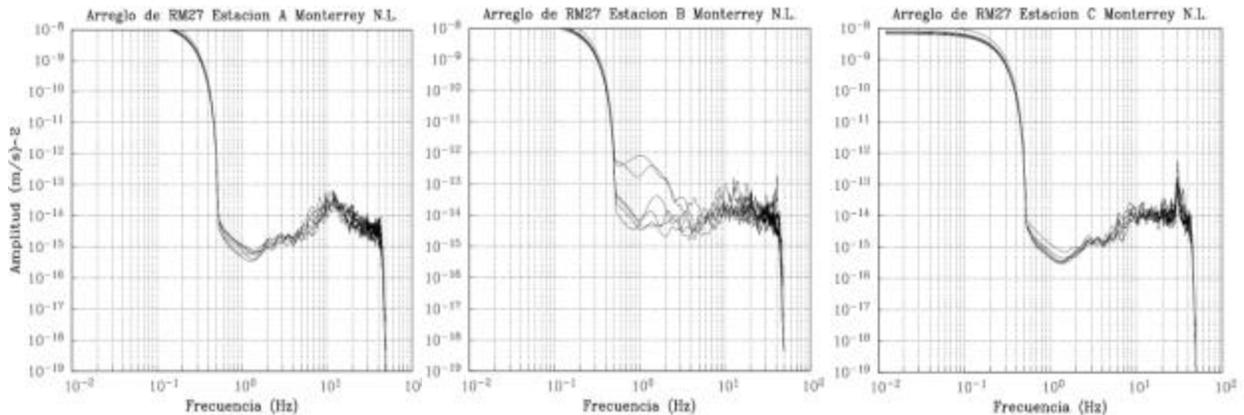


Figura 113. Espectros de potencia de las 6 ventanas seleccionadas de 81.92 s. Para el arreglo de 50m del sitio RM50 de los vértices A, B, C.

Los espectros calculados para los vértices A y C presentan poca dispersión entre ellos aun que el espectro de vértice C tiene un pico predominante hacia altas frecuencias aproximadamente en 30Hz. este pico pudo ser producido por alguna fuente muy cercana a la estación C.

Por otro lado el vértice B muestra dispersión en sus espectros en el rango de 0.5 a 4 Hz. y hacia frecuencias mas altas solo algunos de sus espectros tenían poca dispersión, esto debido a transitorios cercanos a la estación.

Una vez calculados los espectros de potencia se calcularon las correlaciones cruzadas normalizadas de los tres vértices, como se ilustra en la figura 114.

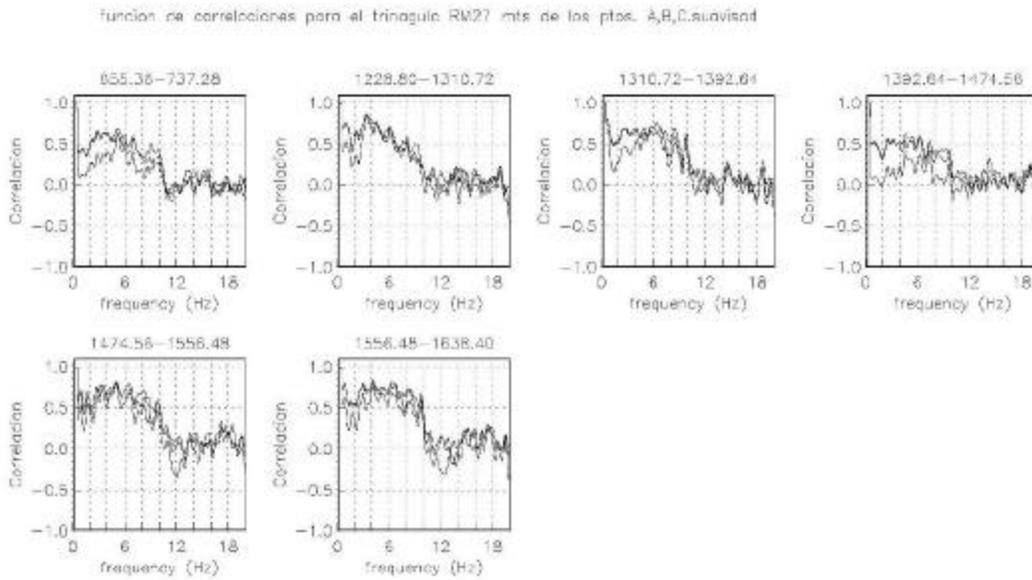


Figura 114. Correlaciones cruzadas seleccionados para el arreglo RM 27 m.

Una vez seleccionadas las ventanas se calcula el coeficiente de auto-correlación de las tres estaciones integrando las tres direcciones de todas las ventanas seleccionadas como se presenta en la figura 115.

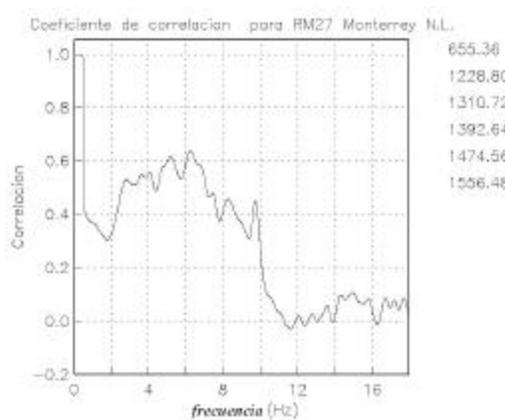


Figura 115. Coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo de 27 m y en la parte derecha se muestra la lista de las 6 ventanas seleccionadas.

Una vez obtenido el coeficiente de auto-correlación se calculó la curva de dispersión como se ilustra en la figura 116.

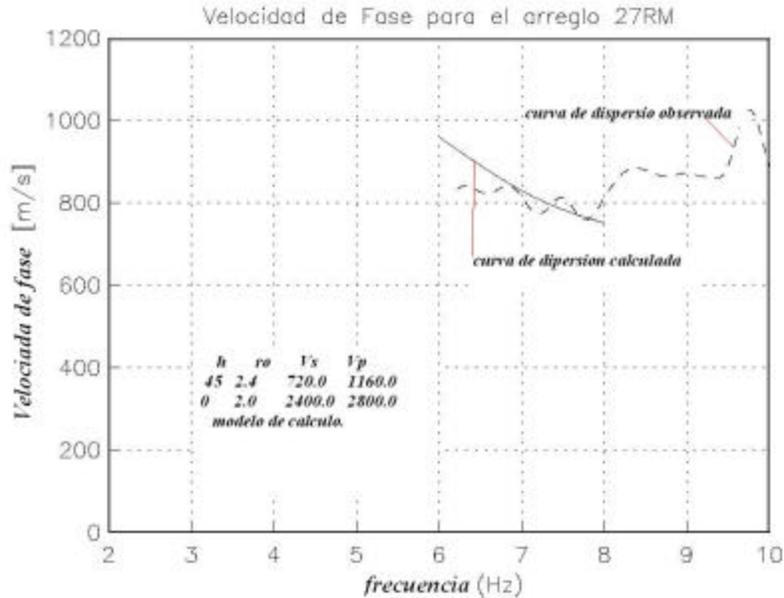


Figura 116. Curva de dispersión (línea punteada) y la curva calculada (línea continua) para el arreglo RM27 en la parte inferior izquierda aparece el modelo de velocidades de la curva calculada.

Una vez, analizados los resultados de los 3 arreglos se superpusieron en una sola gráfica para determinar el ajuste de una sola curva de dispersión, para las diferentes curvas de dispersión obtenidas para las diferentes aberturas realizadas en la colonia Roma. Como se muestra en la figura 117.

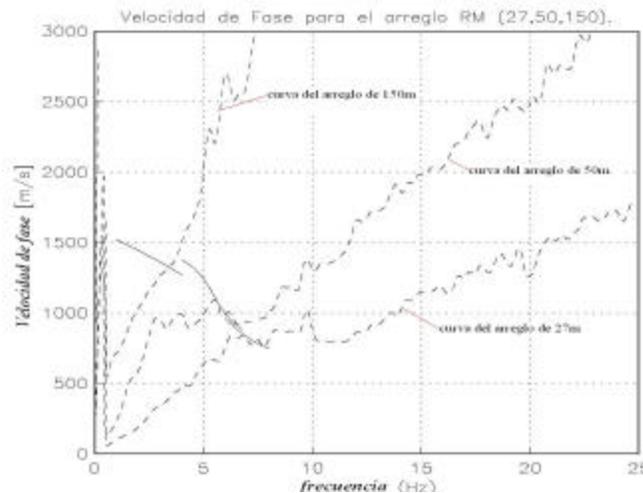


Figura 117. Curvas de dispersión observada para los tres arreglos del sitio los RM de 150 m, 50 m y 27m mostrando la curva observada (línea punteada) y la curva calculada (línea continua).

En este sitio se determinó calcular la curva de dispersión solo para dos arreglos considerando el arreglo de 27 y 50 m solamente debido a que la tercera curva de velocidad de fase solo se tiene control en un punto dentro de la curva de dispersión.

Por lo que para este análisis se consideró únicamente un modelo de una capa y un semi-espacio, considerando un modelo inicial de los modelos calculados para cada arreglo. Obteniendo como resultado

el modelo para las dos curvas de velocidad de fase de los arreglos de 27 y 50 m. como se muestra en la siguiente figura 118.

XIII.4 Resultados de la curva de dispersión de los arreglos RM.

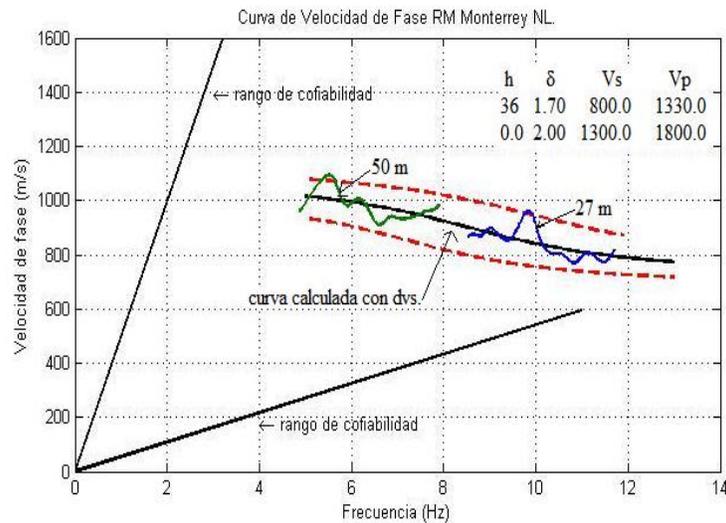


Figura 118. Curva de dispersión observada para los dos arreglos del sitio RM de 27 y 50 m mostrando la curva observada con línea punteada, la curva calculada con línea continua negra mas su desviación estándar con líneas punteadas y su abanico de confiabilidad con líneas continuas, y el modelo utilizado se muestra en la parte superior del lado derecho de la figura.

Una vez ajustada la curva de dispersión de ondas Rayleigh para tres capas y un semi espacio, se invirtió el modelo calculado para obtener la estructura de velocidades para este sitio (ver figura 119).

XIII.5 Estructuras de velocidades del los arreglos RM determinado con un modelo de tres capas y un semi espacio.

Para este sitio de estudio se invirtió un modelo de 1 capa mediante el ajuste de una sola curva de dispersión para los tres arreglos dando como resultado dos estructuras de velocidades, una para ondas P y otra para ondas S. Mostrando una capa constante y llegando así a una profundidad de exploración de 36m.

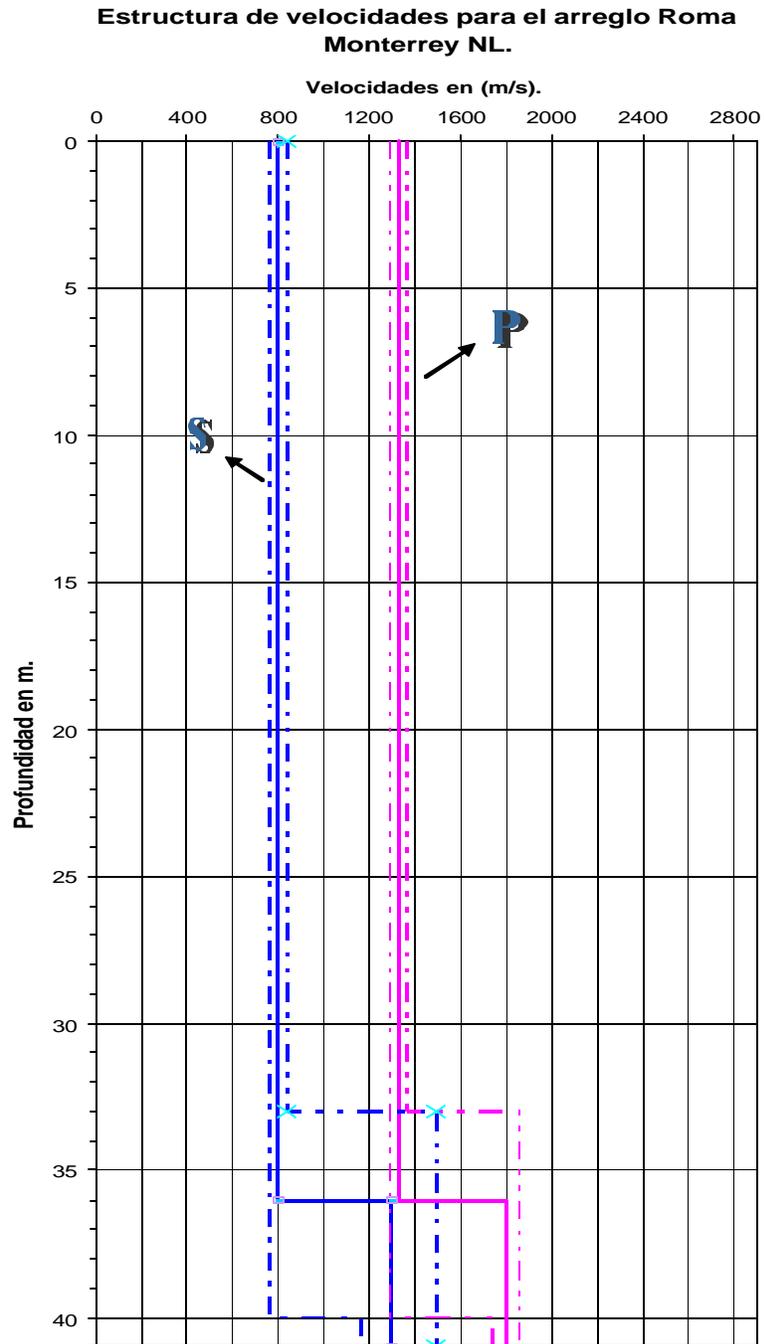


Figura 119. Estructura de velocidades calculadas para los tres vértices ABC de los dos arreglos de RM mostrando velocidad de ondas P (línea continua) y velocidad de ondas S (línea continua) mas sus desviaciones estándar con líneas punteadas.

XIV. ARREGLOS REALIZADOS A UN COSTADO DEL ESTADIO DE LA UANL (EST).

En este sitio se realizaron tres arreglos instrumentales con aberturas de 50,15 y 7.5 m, de los cuales se presentaran de mayor a menor abertura.

XIV.1 ARREGLO EST 50 m.

Para este arreglo se calcularon los espectros de potencia de las 11 ventanas seleccionadas de los tres vértices como se muestran en la figura 120.

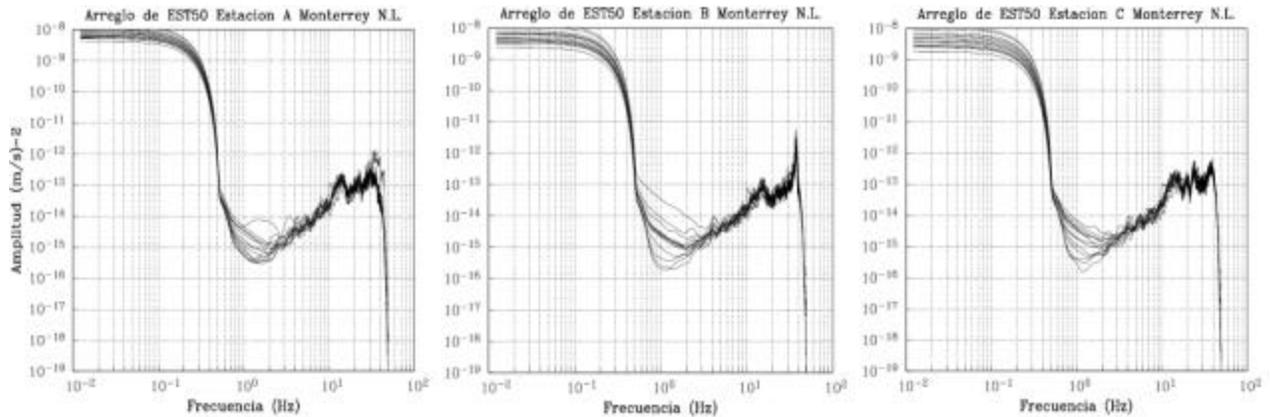


Figura 120. Espectros de potencia de las 11 ventanas seleccionadas de 81.92 s para el arreglo de 50 m del sitio RM50 de los vértices A, B, C.

Los espectros de potencia calculados en los vértices A y C tienen poca dispersión en el rango de frecuencias de 0.3 a 3.0 Hz mientras que a frecuencias mayores de 3.0 Hz se muestran más uniformes entre ellos, conservando aproximadamente la misma amplitud.

El vértice B sus espectros presentan poca dispersión en las frecuencias de 0.3 a 4 Hz. y hacia frecuencias más altas se observa un pico predominante con respecto a los otros vértices A y C, pero teniendo bastante similitud entre sus espectros de este vértice.

Una vez calculados los espectros de potencia se calcularon las correlaciones cruzadas normalizadas para las tres direcciones de los tres vértices, como se ilustra en la figura 121.

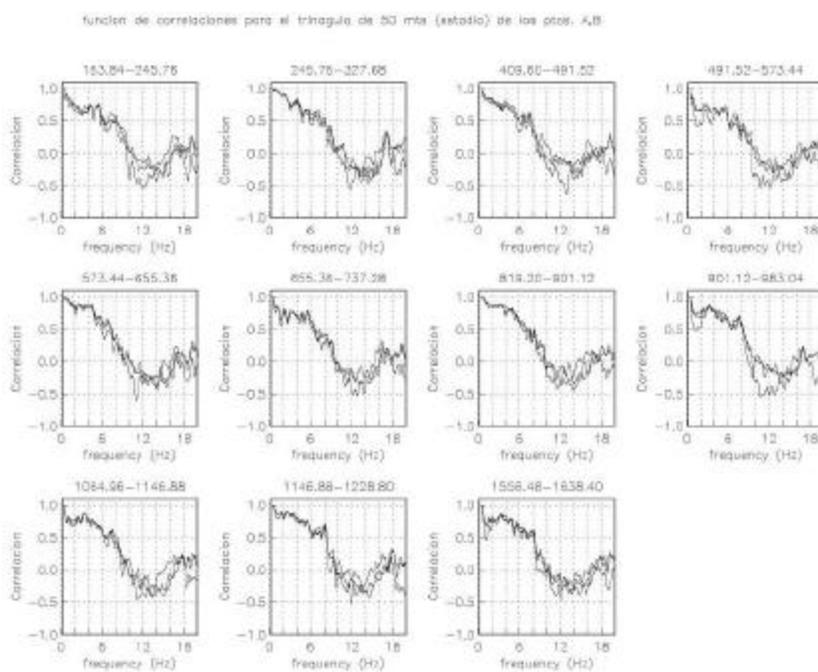


Figura 121. Correlaciones cruzadas seleccionados para el arreglo EST 50 m.

Calculadas las cross correlaciones de las ventanas seleccionadas se calculó el coeficiente de auto-correlación de las tres estaciones integrando en las tres direcciones como se ilustra en la figura 122 y presentando de lado derecho la lista de las ventanas seleccionadas.



Figura 122. Coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo de 50 m. En la parte derecha se muestra la lista de las ventanas seleccionadas.

Una vez obtenido el coeficiente de auto-correlación se calculó la curva de dispersión como se muestra en la figura 123. Esperando encontrar un buen comportamiento decreciente en la curva de dispersión lo que para este caso se analizó en el rango de 5 y 7 Hz.

El modelo que se utilizó para ajustar la curva de dispersión para este arreglo se obtuvo mediante prueba y error hasta obtener un buen ajuste.

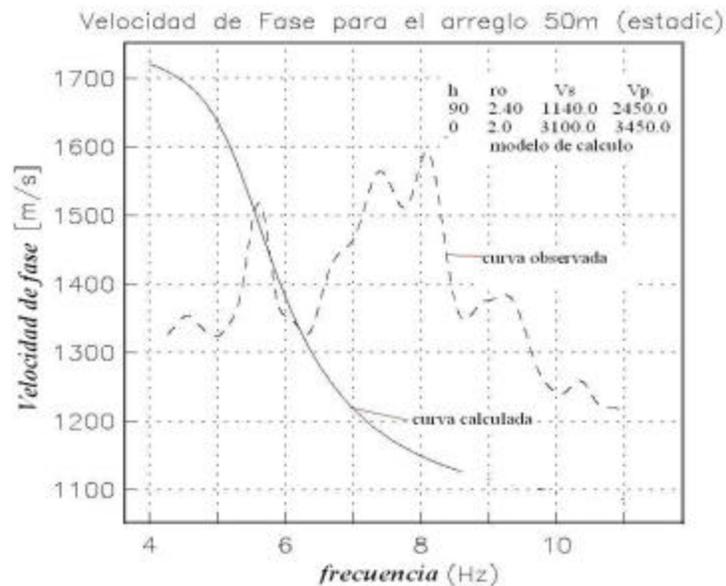


Figura 123. Curva de dispersión observada del arreglo de EST 50 m (línea punteada) y la curva calculada (línea continua) mostrando en la parte superior derecha el modelo utilizado.

XIV.2 ARREGLO EST 15m.

Para este arreglo se calcularon los espectros de potencia de las 12 ventanas seleccionadas de los tres vértices como se muestran en la figura 124.

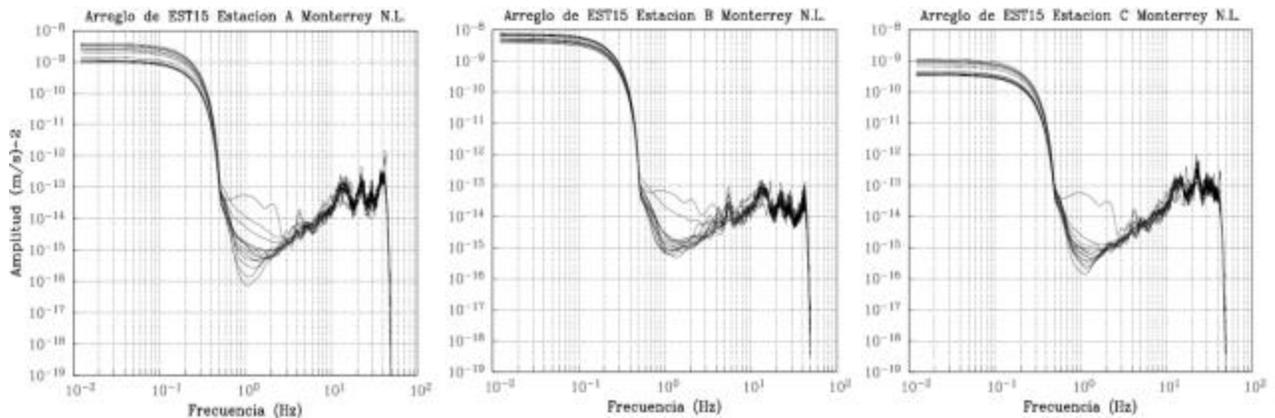


Figura 124. Espectros de potencia de las 12 ventanas seleccionadas de 81.92 s. Para el arreglo de 15 m del sitio EST15 de los vértices A, B, C

Los espectros de potencia de los vértices A y B se muestran similares uno de otro pero con una pequeña diferencia en la amplitud máxima, y en los rangos de frecuencias de 0.3 a 3 Hz presentan dispersión los tres vértices (A, B, y C) pero a frecuencias mayores los espectros tienen mayor similitud entre ellos.

Una vez calculados los espectros de potencia se calcularon las correlaciones cruzadas normalizadas de los tres vértices, como se ilustra en la figura 125.

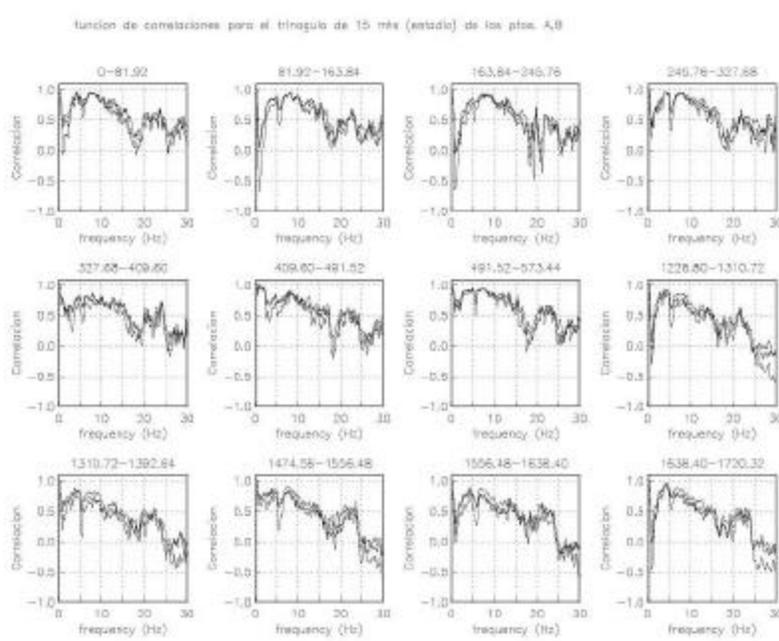


Figura 125. Correlaciones cruzadas seleccionados para el arreglo EST 15 m.

Calculadas las cross correlaciones se calculó el coeficiente de auto-correlación de las tres estaciones integrando en las tres direcciones como se muestra en la figura 126.

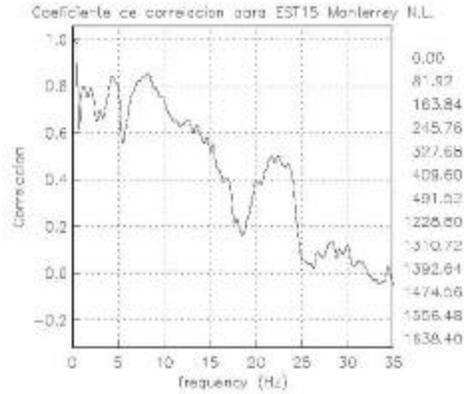


Figura 126. Coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo de 15 m en la parte derecha se muestra la lista de las ventanas seleccionadas.

Una vez obtenido el coeficiente de auto-correlación se calculó la curva de dispersión como se muestra en la figura 127. Esperando encontrar una buena curva de dispersión con un comportamiento decreciente lo que para este caso se analizó en el rango de 8 y 12 Hz.

El modelo que se utilizó para ajustar la curva de dispersión para este arreglo se obtuvo mediante prueba y error hasta obtener un buen ajuste.

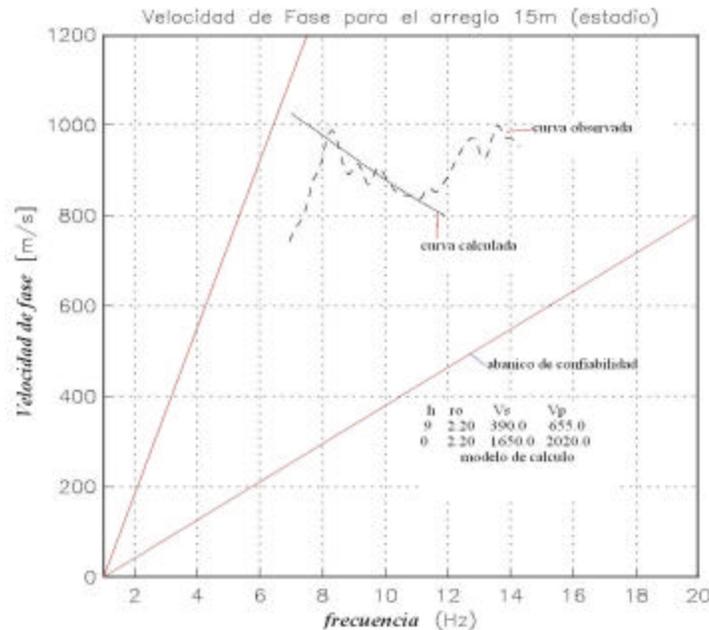


Figura 127. Curva de dispersión observada (línea punteada) y la curva calculada (línea continua), su abanico de confiabilidad que parte desde cero con línea continua. En parte inferior derecha aparece el modelo utilizado.

XIV.3 ARREGLO EST 7.5 m.

En este arreglo se calcularon los espectros de potencia de las 4 ventanas seleccionadas de los tres vértices como se muestran en la figura 128.

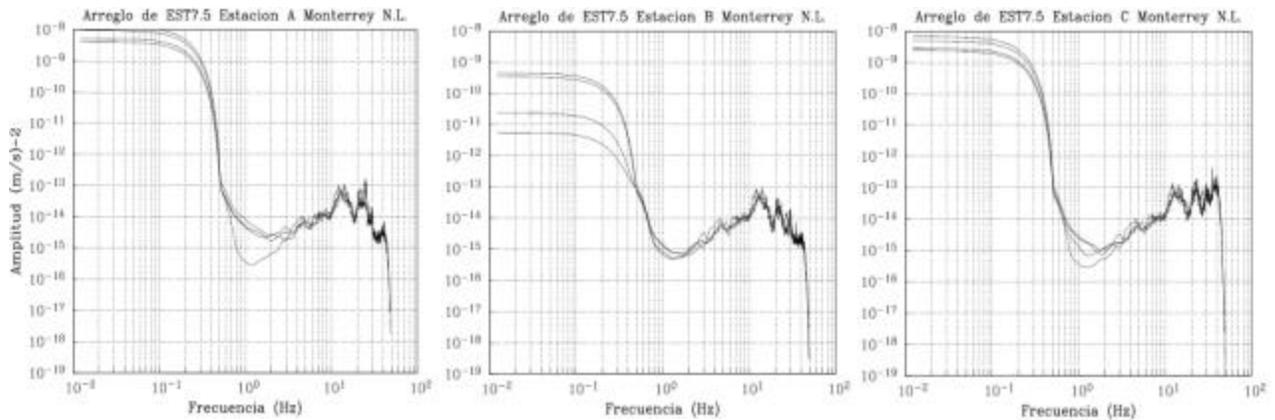


Figura 128. Espectros de potencia de las 4 ventanas seleccionadas de 81.92 s Para el arreglo de 15m. del sitio EST15 de los vértices A, B, C.

Los espectros de potencia calculados para los vértices A y C presentan dispersión en algunos de sus espectros pero en general la mayoría de los espectros tienen bastante similitud entre ellos, así como también se muestran bastante similares entre los tres vértices.

Calculados los espectros de potencia se calculó las correlaciones cruzadas normalizadas para las tres direcciones de los tres vértices.

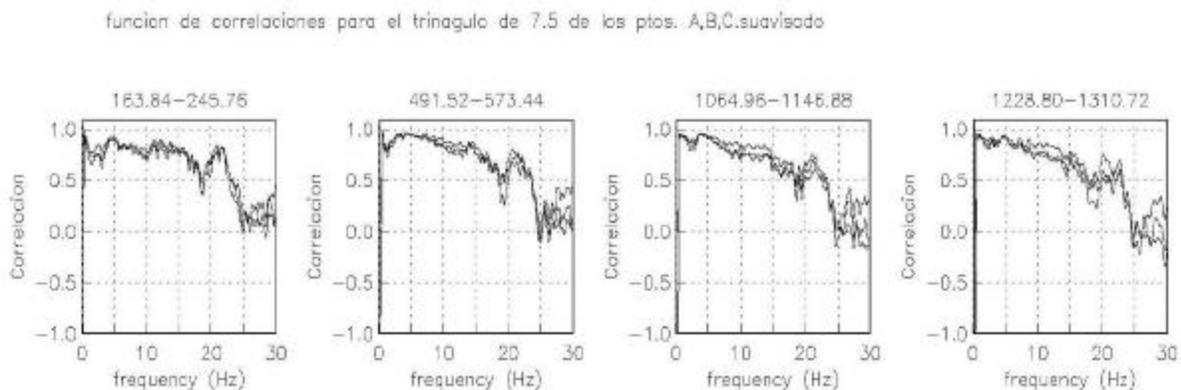


Figura 129. Correlaciones cruzadas seleccionados para el arreglo EST 7.5 m.

Calculadas las cross correlaciones seleccionadas se calculó el coeficiente de auto-correlación de las tres estaciones integrando en las tres direcciones como se ilustra en la figura 150 y presentando en la parte derecha la lista de las ventanas seleccionadas.

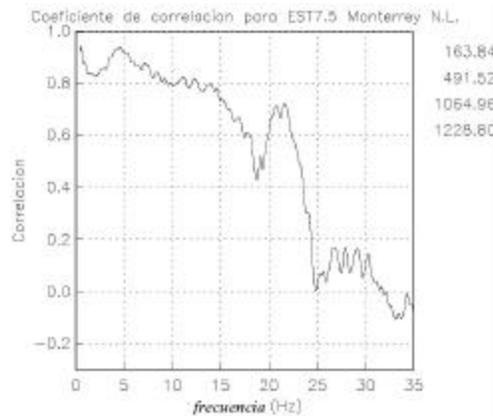


Figura 130. Coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo de 7.5 m en la parte derecha se muestra la lista de las ventanas seleccionadas.

Una vez obtenido el coeficiente de auto-correlación se calculó la curva de dispersión como se muestra en la figura 131. Esperando encontrar una curva de dispersión que sea una curva decreciente lo que para este caso se analizó en el rango de 13 y 20 Hz.

El modelo que se utilizó para ajustar la curva de dispersión para este arreglo se obtuvo mediante prueba y error hasta obtener un buen ajuste.

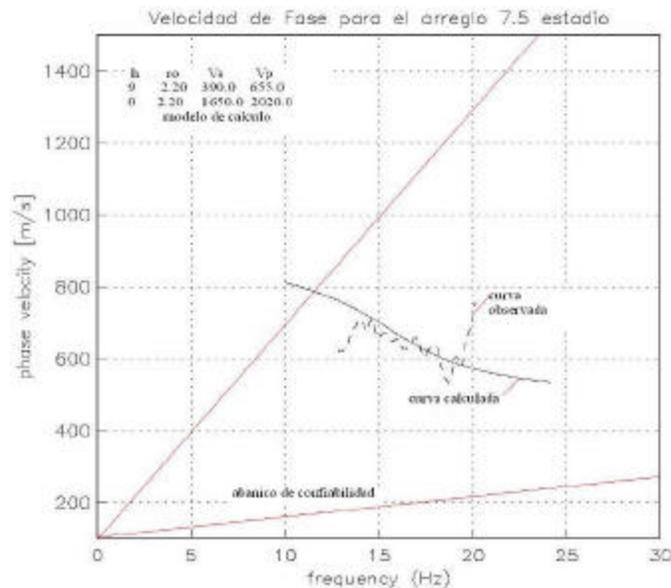


Figura 131. Curva de dispersión (línea punteada) y la curva calculada (línea continua) y su abanico de confiabilidad para el arreglo EST 7.5 en la parte superior izquierda aparece el modelo utilizado.

Calculadas las tres curvas de dispersión de ondas Rayleigh estas se superpusieron en una sola gráfica (ver figura 132) para determinar una sola curva de dispersión para todos los arreglos realizados en este sitio (50 m, 15 m y 7.5 m.).

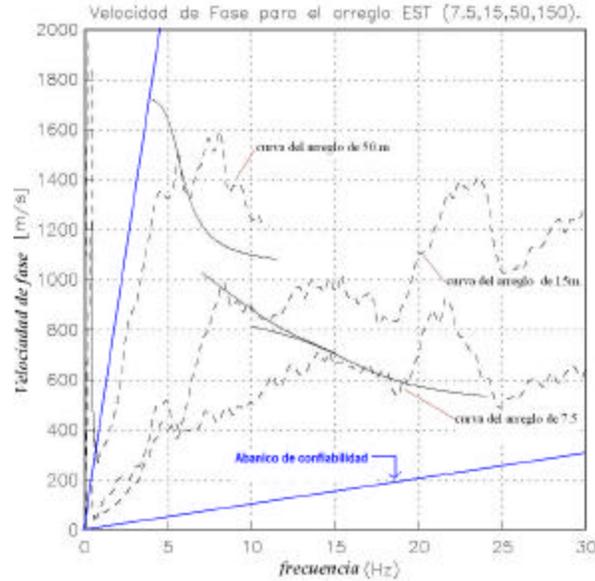


Figura 132. Curvas de dispersión observadas para los tres arreglos del sitio EST de 50m, 15 m y 7.5 m mostrando la curva observada (línea punteada) y la curva calculada (línea continua).

El análisis para ajustar una sola curva de dispersión para los tres arreglos se parte de los modelos obtenidos para cada curva (los cuales se calcularon para una capa y un semi espacio). Proponiendo así un modelo equivalente de tres capas y un semi-espacio para ajustar la curva de dispersión como se ilustra en la figura 133.

XIV.4 Resultados de la curva de dispersión de los arreglo EST. Con el modelo calculado.

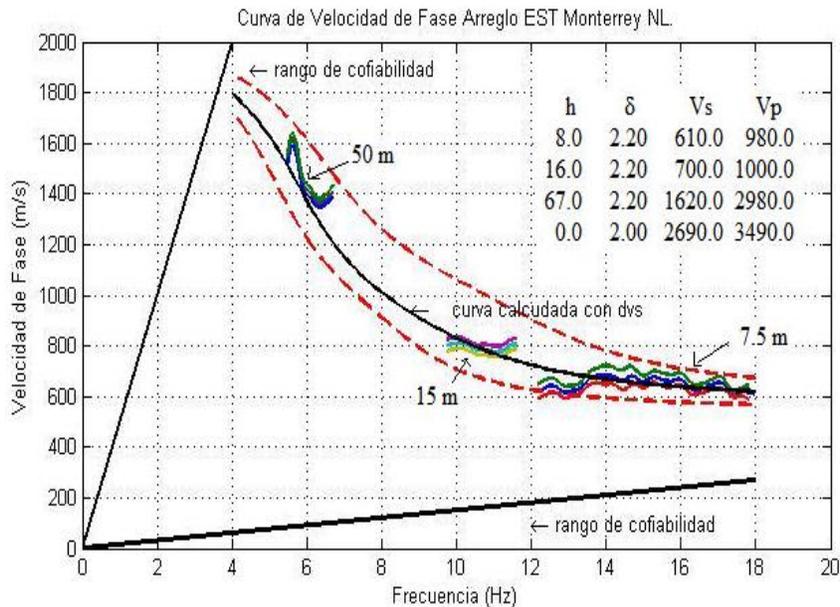


Figura 133. Curva de dispersión observada para los tres arreglos del sitio EST de 50 m, 15 m y 7.5 m mostrando la curva observada con línea punteada y la curva calculada con línea continua. Mostrando en la parte superior derecha el modelo calculado.

Una vez ajustada la curva de dispersión de ondas Rayleigh para tres capas y un semi-espacio se procedió a invertir el modelo calculado para obtener la estructura de velocidades para este sitio (ver figura 134). Obteniendo una profundidad de exploración de aproximadamente 91 m de profundidad.

XIV.5 Estructuras de velocidades del los arreglos EST determinado con un modelo de tres capas y un semi espacio.

En este sitio se determino la estructura de velocidades con mayor profundidad de exploración alrededor de 91 m. Obteniendo así, también un buen ajuste de la curva de dispersión. Para los tres arreglos realizados en este sitio, en un rango de frecuencias de 5 Hz a 18 Hz.

Considerando que estos valores están dentro del abanico de confiabilidad (Miyacoshi 1995). Obteniendo así una buena definición de las estructuras de velocidades tanto para la de ondas P como para las ondas S.

Por otro lado los resultados obtenidos muestran claramente los cambios de fase entre un espesor y otro.

Estructura de Velocidades para el arreglo EST Monterrey NL.

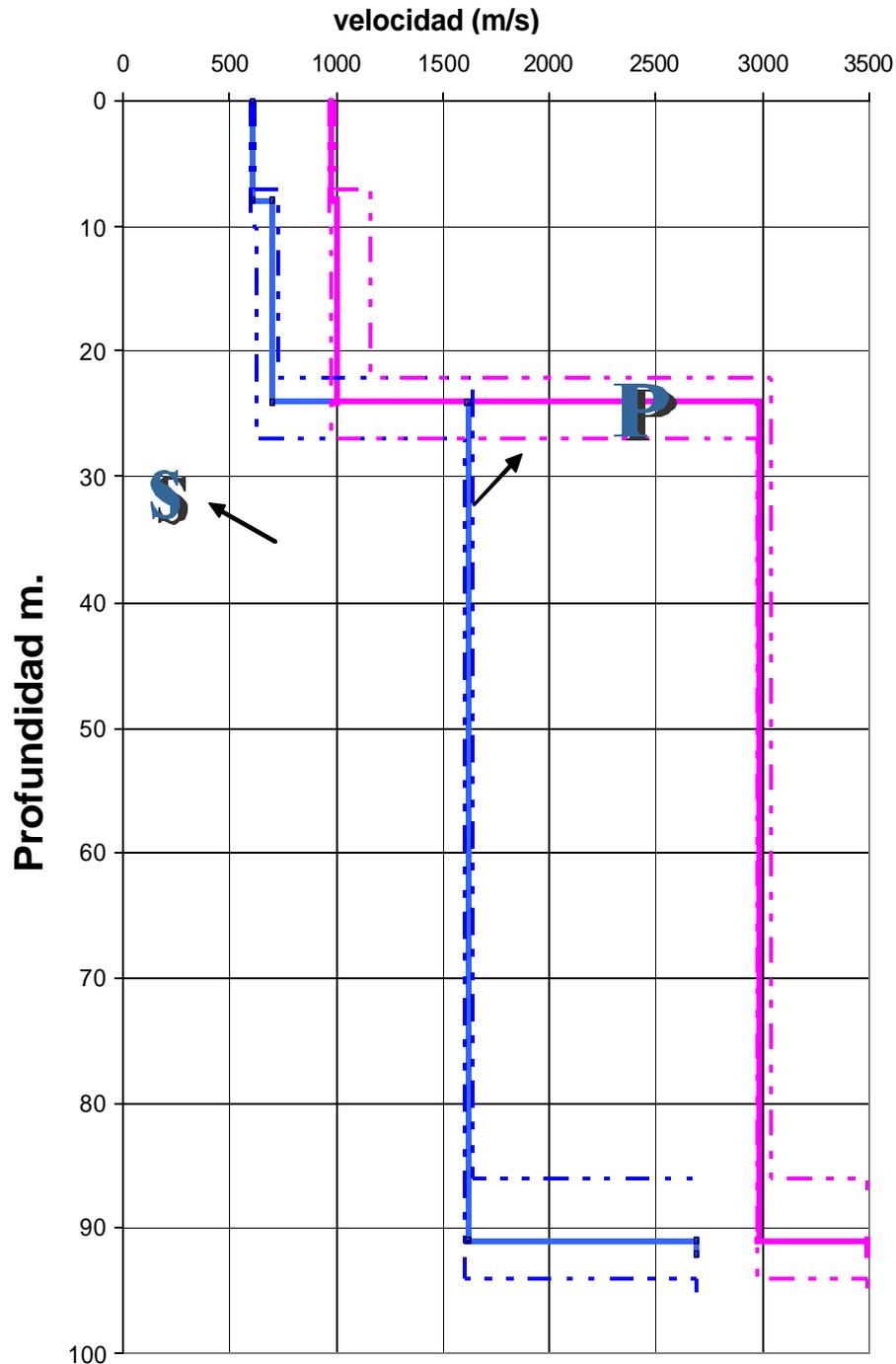


Figura 134. Estructura de velocidades calculadas para los tres vértices ABC de los dos arreglos de EST mostrando velocidad de ondas P (línea continua) y velocidad de ondas S (línea continua) mas sus desviaciones estándar con líneas punteadas .

Antes de mostrar los resultados, hacemos un breve paréntesis para comentar sobre el método unidimensional. Este método unidimensional asume que el suelo tiene un comportamiento lineal para cualquier nivel de excitación en el cual los estratos del suelo son horizontales y se extienden lateralmente hasta el infinito. Por lo tanto, no se incluye efectos de irregularidad lateral al descansar los estratos sobre un semi-espacio homogéneo para realizar este análisis unidimensional utilizamos el método de (Thomson, 1950 y Haskell,1962). El método de Thomson-haskell considera el cálculo de las funciones de transferencia teóricas en medios estratificados ante la incidencia de ondas SH en la base de los estratos.

X. V RESULTADOS.

Los resultados obtenidos a partir de registros de microtemores, en cuatro sitios de la ciudad de Monterrey Nuevo León. Se obtuvieron mediante la realización de varios arreglos triangulares con diferentes aberturas. Realizando esto para cada uno de los sitios de estudio, de los cuales se llegó a invertir la estructura de velocidades de cada sitio. Por otro lado, para dar más confiabilidad a los resultados, se aplicó el método unidimensional en cada sitio con las estructuras obtenidas para compararlas con los periodos dominantes.

Una vez realizado el comentario del método unidimensional, mostraremos los resultados obtenidos a partir del método SPAC, como se muestran a continuación iniciándonos con el sitio RSC.

Para el sitio ubicado en el lecho del río Santa Catarina (RSC) se realizaron tres arreglos con aberturas de 50, 15 y 7.5 m. En este sitio se invirtió la curva de dispersión con los arreglos de 15 y 7.5 m, debido a que los resultados en el arreglo de 50 m no presentaron buenas correlaciones cruzadas, entre los tres vértices. En los otros dos arreglos si se obtuvieron buenas correlaciones cruzadas permitiéndonos obtener una buena definición de los coeficientes de correlación de cada arreglo (el de 7.5m y 15m.). A partir de los coeficientes de correlación se obtuvieron segmentos de la curva de dispersión. Estos segmentos fueron modelados mediante curvas de dispersión teóricas con los modelos mostrados en la tabla 3.

Arreglos RSC (m)	Modelos			
	ho(m)	d (ton/m ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)
7.5				
capa	10.0	2.0	460.0	780.0
Semi-espacio	0.0	2.0	1910.0	2060.0
15				
capa	20	2.20	637.0	1100.0
Semi -espacio	0.0	2.20	2300.0	2900.0

Tabla 3. Muestra los modelos utilizados para el ajuste de cada curva de dispersión de los arreglos realizados en el sitio RSC.

Los modelos determinados en la tabla 3 se utilizaron para proponer el modelo de inicio para calcular el ajuste de una sola curva de dispersión para los dos arreglos que produjeron resultados en este sitio. Llegando así a un modelo final ajustado para las dos curvas de velocidad de fase de los dos arreglos, obteniendo así el modelo mostrado en la tabla 4.

Modelo final para los dos arreglos. (RSC)			
ho (m)	d (ton/m ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)
10	2.2	460.0	935.0

Modelo final para los dos arreglos. (RSC)			
14	2.0	910.0	1410.0
0.0	2.2	2300.0	2950.0

Tabla 4. Muestra el modelo utilizado para el ajuste de la curva de dispersión del sitio RSC utilizando los dos arreglos triangulares el de 7.5 m y 15 m.

Con base en este resultado se logró un buen ajuste de la curva de dispersión llegando a obtener el modelo de dos capas y un semi espacio. La estructura de velocidades invertida tiene una profundidad de exploración de 24 m.

Por otro lado para dar más robustez al modelo calculado, se procedió a compararlo con los periodos dominantes obtenidos para cada arreglo (ver apéndice), usando el modelo unidimensional obtenido partir del método de Haskell como se muestra en la figura 135.

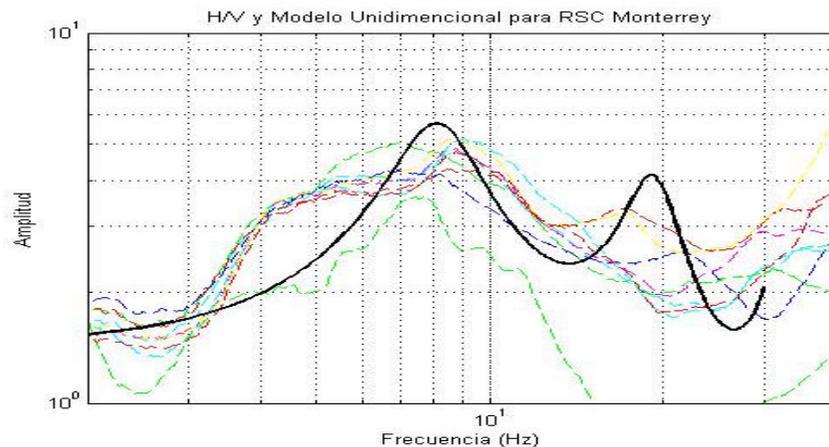


Figura 135. Muestra los promedios de los cocientes H/V obtenidos para este sitio (líneas punteadas) y con línea continua muestra el unidimensional obtenido a partir de la estructura de velocidades calculada para el sitio RSC.

En la gráfica 135 se observa que el periodo obtenido (7 Hz) con el modelo unidimensional está próximo al valor del periodo de resonancia de este sitio lo que da una mayor robustez al modelo calculado con el método SPAC. Sin embargo la comparación no es perfecta ya que se observa que los cocientes espectrales muestran alguna variación en el pico máximo oscilando entre 8 y 9 Hz. Esto es por que el método SPAC produce un modelo promedio y esta basado en capas planas por lo que no refleja información sobre algo puntual.

Para el sitio llamado Predio de los Cuatro Vientos se realizaron cuatro arreglos triangulares con aberturas de 280, 150, 50 y 15 m. Para En este sitio se obtuvieron buenos coeficientes de correlación para cada uno de los arreglos. Estos resultados permitieron obtener una buena definición de las curvas de dispersión en cada uno de los arreglos. En estos arreglos se obtuvo un buen ajuste de la curva de dispersión para cada uno de los arreglos. Los modelos que se utilizaron en cada arreglo se muestran en la tabla 5, estos modelos son de una capa y un semi-espacio.

En este sitio se obtuvieron buenos coeficientes de correlación para cada uno de los arreglos, lo estos resultados permitieron obtener una buena definición de las curvas de dispersión en cada uno de los arreglos.

Arreglos en (m.)	Modelos.			
	ho (m)	d (ton/m ³)	Vs (m/s).	Vp (m/s).
280				
capa	55	2.0	650.0	900.0
Semi-espacio	0.0	2.0	1800.0	2400.0
150				
capa	46	2.0	768.0	950.0
Semi-espacio	0.0	2.0	1670.0	2400.0
50				
capa	44	2.0	745.0	900.0
Semi-espacio	0.0	2.0	2000.0	2610.0
15				
capa	20	1.2	380.0	830.0
Semi-espacio	0	2.0	750.0	1290.0

Tabla 5. Muestra los modelos utilizados para el ajuste de cada una de las curvas de dispersión de cada arreglo realizado en el sitio PL4V.

Con estos modelos se propuso un modelo inicial para ajustar una sola curva de dispersión para los 4 arreglos de este sitio. Como se mostró en la figura 123 hasta llegar a obtener el modelo final como se muestra en la tabla 6. Con el modelo, se obtuvo un buen ajuste de la curva de dispersión para los cuatro arreglos realizados en este sitio.

Sitio PL4V	Modelo			
	ho (m)	d (ton/m ³)	Vs (m/s).	Vp (m/s).
capa	21	1.2	400.0	830.0
capa	26	2.0	800.0	1000.0
capa	9	2.0	890.0	1100.0
capa	24	2.0	1400.0	2300.0
Semi-espacio	0.0	2.0	1580.0	2610.0

Tabla 6. Muestra el modelo utilizado para el ajuste de la curva de dispersión del sitio PL4V.

Con este modelo se obtuvo una estructura de velocidades con una profundidad de exploración de 80 m.

Para darle más confiabilidad a nuestro modelo, usamos el método de Haskell para obtener la respuesta del modelo unidimensional y comparar este con los cocientes espectrales H/V calculados para este sitio como se muestra en la figura 136.

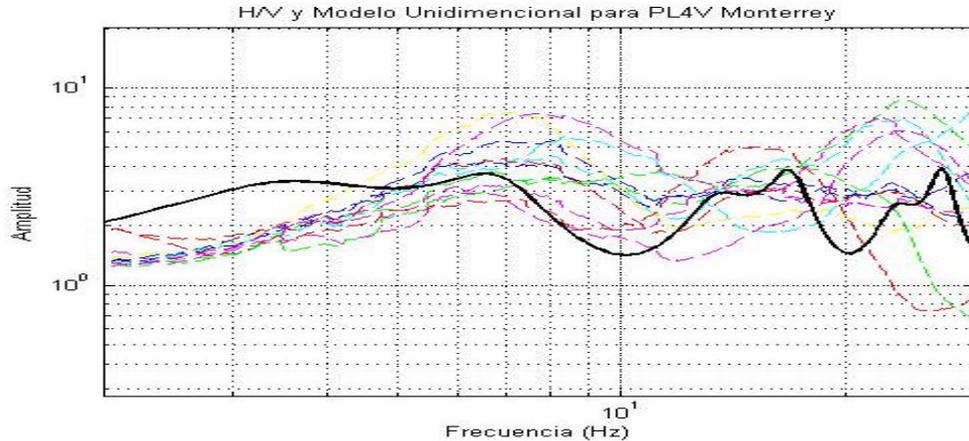


Figura 136. Muestra los promedios de los cocientes H/V obtenidos para este sitio (líneas punteadas) y con línea continua muestra el unidimensional obtenido a partir de la estructura de velocidades calculada para el sitio PL4V.

Como podemos observar en la figura B6 el modelo unidimensional y los cocientes espectrales H/V calculados para este sitio muestran una aproximación entre los picos máximos obtenidos alrededor de 6 Hz en promedio de los cocientes H/V no obstante aun con la dispersión que presentan en altas frecuencias.

Para el sitio ubicado en la colonia Roma (RM), se realizaron tres arreglos con aberturas de 150, 50 y 27 m. En este sitio se obtuvo la curva de dispersión con 2 arreglos debido a que para el arreglo de 150 m no se obtuvo una buena definición de la curva de velocidad de fase. Por ello que solo se llegó a estimar un punto dentro de la curva de dispersión. No obstante, se utilizó para estimar la curva de dispersión de los tres arreglos. En la tabla 7 se muestran los modelos que se utilizaron para ajustar cada una de las curvas de dispersión.

Arreglo en (m)	Modelos.			
	ho (m)	d (ton/m ³)	Vs (m/s).	Vp (m/s).
150				
capa	20	2.4	700.0	950.0
Semi-espacio	0.0	2.0	2000.0	2500.0
50				
capa	59	2.4	800.0	1500.0
Semi-espacio	0.0	2.0	2080.0	2980.0
27				
capa	45	2.4	720.0	1160.0
Semi-espacio	0.0	2.0	2400.0	2800.0

Tabla 7. Muestra los modelos utilizados para el ajuste de cada curva de dispersión de los arreglos realizados en el sitio RM.

Los modelos de la tabla 7 se utilizaron para proponer un modelo inicial para calcular el ajuste de una sola curva de dispersión para los tres arreglos, de esta manera se llegó a un solo modelo final ajustado para las tres curvas de velocidad de fase de los tres arreglos. Este modelo final mostrado en la tabla 8.

Sitio RM.	Modelo final para los tres arreglos.			
	ho(m)	d (ton/m ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)
capa	37	1.7	800.0	1330.0
Semi espacio	0.0	2.0	1300.0	1800.0

Tabla 8. Muestra el modelo utilizado para el ajuste de la curva de dispersión del sitio RM.

Con base en este resultado se logró un buen ajuste de la curva de dispersión, e invirtiendo el modelo se obtuvo una estructura de velocidades con una profundidad de exploración de 37m.

Utilizamos el modelo de la estructura de velocidades lo para calcular el modelo unidimensional y compararlo con los cocientes espectrales como se muestra en la figura 137.

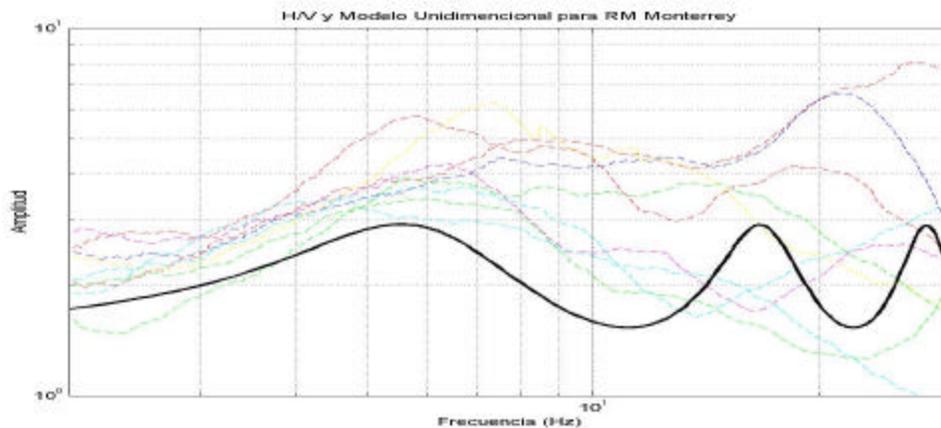


Figura 137. Muestra los promedios de los cocientes H/V obtenidos para este sitio (líneas punteadas) y con línea continua muestra el unidimensional obtenido a partir de la estructura de velocidades calculada para el sitio RM.

Como podemos observar en la figura 137 la mayoría de los cocientes espectrales calculados para este sitio muestran un pico predominante alrededor de 4.5 a 6 Hz. Esto debido a la ubicación del sitio que estaba en una zona de tránsito constante, lo que provocó obtener dispersión en los H/V a altas frecuencias. No obstante es bueno el ajuste con la función de transferencia del modelo unidimensional calculado con la estructura de velocidades obtenida con el método SPAC.

Para el último sitio localizado en el estacionamiento del estadio de fútbol de la UANL (EST) se realizaron tres arreglos triangulares con aberturas de 50, 15 y 7.5 m. En este sitio se obtuvo buen ajuste para cada arreglo con los modelos que se muestran en la tabla 13. En cada uno, se usó una capa y un semi-espacio.

Arreglo en (m)	Modelos.			
	ho (m)	d (ton/m ³)	Vs (m/s).	Vp (m/s).
50				
capa	90	2.4	1140.0	2450.0
Semi-espacio	0.0	2.0	3100.0	3450.0
15				
capa	9	2.2	390.0	655.0
Semi-espacio	0.0	2.2	1650.0	2020.0

7.5				
capa	14	2.2	557.0	890.0
Semi-espacio	0.0	2.2	1550.0	1800.0

Tabla 9. Muestra los modelos utilizados para el ajuste de cada curva de dispersión de los 3 arreglos realizados en el sitio EST.

Los modelos de la tabla 9 se utilizaron para proponer el modelo inicial para calcular el ajuste de una sola curva de dispersión para los tres arreglos. De esta manera se llegó a un solo modelo final ajustado para las tres curvas de velocidad de fase de los tres arreglos. Este modelo final es mostrado en la tabla 10.

Sitio EST	Modelo			
	ho (m)	d (ton/m ³)	Vs (m/s).	Vp (m/s).
capa	10	2.2	610	980.0
capa	14	2.2	720.0	1120.0
capa	68	2.2	1500.0	2800.0
Semi-espacio	0.0	2.2	2600.0	3400.0

Tabla10. Muestra el modelo utilizado para el ajuste de la curva de dispersión del sitio EST.

Este modelo permitió determinar la estructura de velocidades de este sitio con una profundidad de exploración de 92 m. Con este modelo obtenido se calculó la función de transferencia el modelo unidimensional para este sitio. Para compararlo con los cocientes espectrales H/V calculados en cada uno de los arreglos realizados en este sitio (ver figura 138).

Como se observa en la figura B8 el modelo unidimensional calculado coincide en promedio con los rangos de los picos predomines de los cocientes H/V calculados para este sitio. Esto aumenta la confiabilidad en nuestro resultado en el modelo de velocidades obtenido con el método SPAC.

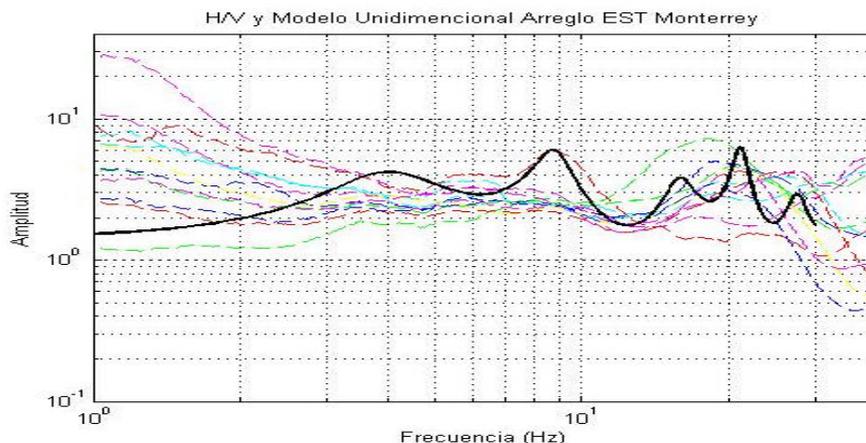


Figura 138. Muestra los promedios de los cocientes H/V obtenidos para este sitio (líneas punteadas) y con línea continua muestra el unidimensional obtenido a partir de la estructura de velocidades calculada para el sitio EST.

Con los 12 arreglos triangulares realizados en la ciudad de Monterrey, Nuevo León con distancias que variaron entre 7.5 y 280 m, se lograron calcular curvas de dispersión para cada uno de los sitios de estudio (EST, PL4V, RSC, RM). Con esta información se logró obtener resultados de las velocidades de los estratos más superficiales. A un considerando la abertura mas grande de 280 m para el sitio PL4V. Llegado a obtener una profundidad mínima de alrededor de 24 m para el sitio RSC y una profundidad de exploración máxima de 92 m para el sitio EST.

Por otro lado, se obtuvieron resultados de las velocidades de los estratos superficiales fluctuando entre los 400 m/s y 1500 m/s (para ondas S) para las capas más superficiales. Lo que muestra que los sedimentos en las capas más superficiales son bastante competentes. El estrato superficial con menor velocidad se observó en el sitio PL4V, mientras que el de mayor velocidad se observó en el sitio EST.

Dando buenos resultados la inversión de los modelos de velocidades al calcular los modelos unidimensionales, lo que nos da mayor certeza en nuestros resultados.

X. VI CONCLUSION.

Los resultados de este trabajo nos han permitido conocer la estructura de velocidades en cuatro diferentes sitios de la ciudad de Monterrey N.L. (PL4V, RSC, EST y RM). Llegándose a estimar estructuras de velocidades de los estratos más superficiales en los cuatro sitios de estudio con una profundidad de exploración de 24 m hasta 91 m; con velocidades que oscilan en un rango de 400 m/s a 1500 m/s (para ondas S) y de 930 m/s a 2800 m/s (para ondas P). Por lo que estos resultados se muestran verazmente confiables, al poderlos relacionar a grosso modo con las diferentes unidades litológicas del área de estudio (Montalvo Arrieta *et al.* (2006) atribuyen la relación entre los limos, arenas, gravas y lutitas son parte de la formación Méndez).

Los sitios del valle de Monterrey tienen una geología superficial variada (influenciada por la formación Méndez). Estos presentan una heterogeneidad en su estratificación así como diferentes grados de consolidación. Esto en algunos casos puede causar algunos contrastes de impedancia en el viaje de los microtemores. Si consideramos la relación entre el sitio PLV4 para la primera capa tenemos una velocidad promedio (V_s) de 400 m/s, mientras que para los sitios EST tenemos 610 m/s y RM de 800 m/s. La ubicación de estos sitios es relativamente cerca, y se observa que los resultados de la capa superficial existe una variación en la velocidad, lo que si hacemos la suposición de que es un mismo estrato este podría estar afectado por su grado de consolidación o bien esto puede ser algún cambio de estrato. Pero esto cabe recalcar que son meras suposiciones, por lo que para afirmar es necesario corroborarlo con datos de pozos y algunos datos geotécnicos (ya que estamos haciendo la suposición sobre la capa superficial).

Por otro lado los modelos unidimensionales mostraron una buena relación al compararlos con los cocientes espectrales H/V en el mismo rango de frecuencias, aunque presentaron algunas diferencias en la amplitud, esto puede estar influenciado por los valores de la atenuación y por otro lado, tenemos que los cocientes espectrales solo determinan el periodo dominante y no muestran del todo la amplificación del terreno. Para tener un mejor control en los resultados de la amplificación del terreno se sugiere compararlos con los cocientes espectrales de eventos sísmicos.

Los resultados de este trabajo nos han permitido determinar la estructura de velocidades en cuatro diferentes sitios de la ciudad de Monterrey. Los diferentes perfiles encontrados muestran las diferentes respuestas que tiene el terreno para las ondas sísmicas en los cuatro lugares estudiados. Son por ello útiles y sirven de referencia para los estudios de peligrosidad sísmica que eventualmente se puedan realizar en esta ciudad.

Si queremos tener un estudio más a detalle de toda la ciudad de Monterrey, N. L. es necesario realizar más arreglos en otros puntos de la ciudad, procurando cubrir toda la mancha urbana y realizando arreglos con mayor abertura. Para complementarlo con los resultados obtenidos en los cuatro sitios de estudio y así determinar la estructura de velocidades de toda la ciudad así como también el mapa de microzonificación sísmica.

Dotar de este tipo de información a los organismos correspondientes, tanto a la comunidad científica como para la civil será de vital importancia para mejorar el reglamento de construcciones existente de la Ciudad

de Monterrey, N. L. ya que la mayoría de los reglamentos de construcciones esta basado con el de la ciudad de México . Este reglamento entonces, permitirá a los constructores y a la sociedad tener un mayor control a la hora de diseñar las obras civiles al tomar en cuenta este tipo de información. Ya que la ciudad ha tenido un gran desarrollo en cuanto a población y desarrollo urbano considerable.

La aplicación del método SPAC en este tipo de ciudades resulta muy práctico y de bajo costo. Por un lado tenemos la fácil adquisición de datos que no requiere muchas estaciones (mínimo 3), y no se tiene que esperar la ocurrencia de un evento sísmico para determinar el efecto de sitio.

Por otro lado para tener más certeza en los resultados se sugiere comparar los resultados con información de pozos.

X. VII CONCLUSIONES DE AMBOS CASOS.

Para la ciudad de Uruapan se concluye con lo siguiente.

Se logró estimar la estructura de velocidades para 8 arreglos (1, 2, 4, 5, 8, 9, 12, 14) y para los arreglos 3, 10,15, 17 solo se logro estimar un solo punto dentro de la curva de dispersión. Lo que esta información es de gran utilidad para estudios posteriores que se realicen en estos sitios.

A partir de los modelos propuestos se obtuvo una estructura de velocidades para una capa muy gruesa (utilizando modelos de velocidades de una sola capa y un semi espacio) debido a que el contenido de información que se obtuvo estuvo limitada por el tamaño del arreglo, lo que solo proporciono la profundidad del basamento.

Lo que resulta de vital importancia el dotar de este tipo de información en zonas de alta sismicidad como lo es la ciudad de Uruapan Michoacán. Para evaluar el riesgo sísmico con datos más fidedignos y estos sean considerados dentro del diseño de obras civiles.

En los arreglos (6,7,11,13,16, 18) que no se logró obtener buenas cross-correlaciones, si bien existe una cierta relación entre los arreglos que no tuvieron buena correlación y el hecho de que atravesase un cause de río entre las estaciones de algunos arreglos, no existe lógica alguna entre las malas correlaciones y los cambios bruscos en su topografía. ya que en este caso dependió mas de las fuentes muy locales.

Para obtener mayor control de los resultados, se propone hacer arreglos triangulares consecutivos de menor abertura en sitios que sean representativos de toda la ciudad de Uruapan Michoacán. Esto para tener una mejor estimación de los estratos más superficiales, así como también obtener una mejor evaluación de los efectos de sitio y la estructura de velocidades.

Con el estudio realizado en la ciudad de Uruapan Michoacán se logro determinar el mapa de Microzonificación sísmica (Vázquez Rosas R. *et. al.* 2003), así como también se determinó la profundidad de la capa dura de algunos sitios de la ciudad utilizando el Método SPAC.

Cuando se trabaja con arreglos grandes se debe tener cuidado al considerar el factor de suavizado así como también el rango de frecuencias del equipo que se utilice para realizar las mediciones y por ultimo analizar el rango de frecuencias con el que se esta buscando para así mismo eliminar efectos de transitorios no deseados.

Para dar más robustez a los resultados se propone correlacionar la información con otros datos.

- a). Periodos dominantes.
- b). Correlacionarlos con datos de pozos.

Para la ciudad de Monterrey Nuevo León se llegaron a las siguientes conclusiones.

Con esta información se obtuvieron resultados de las velocidades de los estratos más superficiales en los cuatro sitios estudiados.

Se estimó un estructura de velocidades para los cuatro sitios de estudio con profundidades alrededor de RSC (7.5, 15m.) 24m, EST (7, 15,150m.)92m, RM (27, 50m) 37m, PL4V (15, 50150, 280m) 80m.

Se compararon con los periodos dominantes utilizando el método de Tomsom Haskell mostrando buena similitud en un amplio rango de frecuencias, aunque algunos presentaron una pequeña variación en el periodo esto debido a algunas fuentes locales de los sitios.

Las velocidades que se obtuvieron relativamente altas ($V_S > 450\text{m/s}$) son debido a que a mayores profundidades se presenta un grado de consolidación mayor (referido a sedimentos del cuaternario).

Los resultados obtenidos en los cuatro sitios muestran una estimación promedio a lo largo de un volumen de una estructura de velocidades del sitio que se calculó por medio de la propagación de ondas superficiales sobre todo cuando se tiene una geología variada, como la que presenta la ciudad de Monterrey, Nuevo León.

En este estudio se observó claramente la tendencia descendente de la curva de dispersión es decir que hacia frecuencias bajas, mayor velocidad de estrato. Mientras que para las frecuencias altas la velocidad disminuye, lo que nos permite obtener una buena curva de dispersión para distintas aberturas en un sitio. Como también nos permite ver que conforme se aumenta la distancia se explora hacia bajas frecuencias.

Algunas recomendaciones que se deben considerar para el análisis, tener cuidado al seleccionar las correlaciones cruzadas así como también la aplicación del factor de suavizado.

Para obtener mayor control en resultados esta información la tenemos que correlacionar con datos de pozos. Aunque una de las ventajas de utilizar este tipo de métodos es que la información que proporcionan del medio (estratigrafía) es un promedio del área comprendida en el arreglo, cosa que el tener datos de pozo estos se restringen a proporcionar información puntual del medio.

La aplicación del método SPAC resulta bastante competente para la determinación de estructuras de velocidades, así como también es un método bastante económico a comparación de los métodos convencionales que se utilizan para determinar las estructuras de velocidades. Por otro lado su aplicación solo requiere un mínimo de tres estaciones.

La realización de este tipo de estudios, son necesarios para ciudades pobladas como es el caso de Monterrey y las zonas sísmicas, ya que la información que se proporciona es de vital importancia para las obras civiles.

REFERENCIAS

Aguirre González Jorge, 2001. Aplicación de observación de arreglos de microtremores a estudios geotécnicos mediante el método SPAC. Reporte Instituto de Ingeniería, UNAM Julio, 2001.

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

Alva-Niño, E., (1995). *Datos base y metodología para la elaboración de una carta ingeniero-geológica de la zona metropolitana de Monterrey, N.L., México*. Bs. Tesis, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, 82p.

Asten M. W. (1978). Geological control on the three-component spectra of Rayleigh wave microseisms, *Bull. Sism.Soc.Am.*68, 1623-1635

Asten, M. W. and Hestridge, J.D (1984). "Array estimations and the use of microseisms for reconnaissance of sedimentary basins", *Gephysics*, 49, 1828-1837.

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.

Capon, J. (1969), "High-resolution frequency-wave number spectrum analysis", *Proceedings, IEEE*, 57 (8), 1408-1418.

Cavazos Tovar, N. P. (2007). Microzonación de la Ciudad de Monterrey, N. L., basada en geología y velocidades de propagación de ondas sísmicas. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL. 86 pp + anexos.

Chávez-Cabello G., Cossío-Torres, T., and Peterson- Rodríguez, R. H., (2004). Change of the maximum principal stress during the Laramide Orogeny in the Monterrey salient, northeast México, in: Sussman, A.J., and Weil, A.B., eds., *Orogenic Curvature: Integrating Paleomagnetic and Structural Analyses*, *Geol. Soc. Am. Sp. Pap.* 383,145-159.

Chávez-García, F. J., F. J. Sánchez-Sesma, M. Campillo y P. I. Bard (1994), "El terremoto de Michoacán de septiembre de 1985: efectos de fuente, trayecto y sitio", *Física de la Tierra*, G. Madrid, España pp.157-200.

Chávez-García, F. J., and J. Cuenca (1998), "Site Effects and Microzonation in Acapulco", *Earthquake Spectra* 14,pp. 75-93.

Doser, D.I., 1987. The 16 August 1931 Valentine, Texas, earthquake: evidence for normal faulting in west Texas, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 77,2005-2017

Field, E. H., (1994), "Earthquake Site Response Estimation". Ph.D. thesis, Columbia University E.U.A.

Flores Estrella H., (2001), "Métodos alternos para la estimación de efectos de sitio mediante el uso de arreglos de microtemores". *Tesis de licenciatura., Facultad de Ingeniería. UNAM México, Marzo 2001.*

Galván-Ramírez, I. N., y Montalvo-Arrieta, J. C. 2007. The historical Seismicity and prediction of ground motion in Northeast Mexico (24-31°N, 97-106°W). *Journal of South American Earth Sciences*. En revisión.

García Acosta V. (coordinadora),(1992). Estudios Históricos Sobre Desastres Naturales en México. Centro de investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social. México.76p.

García Acosta V. y Suárez Reynoso G., (1996), Los sismos en la historia de México, primera edición, tomo1, Ediciones Científicas Universitarias, coedición UNAM y el Fondo de cultura económica.

Garduño M. V. H., y Torres Escamilla J. R., (1998). Descripción Histórica de la Sismicidad en Michoacán. México, Ciencia Nicolaita. P. 57-81

Garduño M. V. H., Arreigue R.E., Chiesa S., Israde Alcantar I., Rodríguez T,G,M. Y Ayala G. M., (1998), "Las Fallas geológicas y sísmicas de la ciudad de Morelia y su influencia en la amplificación del territorio". *Ingeniería civil*, Vol. 1, No5. p. 3-12.

Garduño M. V. H., Corona-Chávez P., Israde Alcantar I., Menella L., Arreygue, E., Bigiogero B. y Chiesa S., (1999). Carta Geológica de Michoacán.

Gutierrez. C., S. K. Shingh (1992), "A site effect study in Acapulco Guerrero, Mexico: A comparison of results from strong motion and microtemor data". *Bull.Seism.Soc.Am.*82, pp.642-659

Haskell, N.A (1962)," Crustal reflection of plane P and Sv waves", *J. Geophysics Res*, 67, 4751-67.

Henstrindge D. J. (1979). A signal processing method for circular arrays, *Geophysics* 44, 179-184.

Horike, M. (1985), "Inversion of Phase Velocity of Long-Period Microtemors to the S-wave Velocity Structure down to the basement in urbanized areas", *J.Phys.Earth*, 33 pp. 59-96.

Información proporcionada en las oficinas de INEGI en la ciudad de Morelia Michoacán, (2001).

Información proporcionada por *Anuario Estadístico 2002 Nuevo León, SAGARPA (complementada con datos poblacionales del INEGI).*

Iris. Servicios de consulta en línea, (2001), <http://www.iris.Washington.edu>.

Jara J. M. y Sánchez A. R., (2001). "Estimación de Riesgo Sísmico de Morelia". *Revista de la coordinación científica de UMNSH*. No. 29.

Kanai, K., T. Tanaka and K. Okada, 1954. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 32 (1954),199.

Kulhánek, O., (1976), "Introduction to digital filtering in Geophysics." *Elsevier Scientific Publishing Company*, The Netherlands, 168 pp.

Lacoss, R. T., E. J. Kelly, and M.N. Toksoz (1969). Estimation of seismic noise structure using arrays. *Geophysics* 34. 21-38.

Lermo, J., M. Rodríguez y S. K. Shing,(1998). "Natural Period of sites in the Valley of Mexico from Micro tremor Measurements and Strong Motion Data". *Earthquake Spectra*, 4, pp.805-814.

Lermo, J. (1992), Observaciones de microtemores y su aplicación en Ingeniería sísmica. Tesis de maestría, Facultad de Ciencias, UNAM.

Matsuoka, T., N. Umezawa, and H. Makishima (1996). Experimental studies on the applicability of the spatial autocorrelation method for estimation of geological structures using microtemores, BUTSURI-TANSA 49. 26-41 (in Japanese whit English abstract).

Matsushima, T. H. Okada and S. Ling (1996). Determination of deep geological structures under urban areas, BUTSURI-TANSA 43, 21-33.

Martínez B. A. Y Javier C. C., (1991). Carta sísmica del estado de Michoacán. Instituto de Ingeniería, UNAM, 61p.

McKee, JW. , Jones, N. W., y Long, L. E., (1990).*Stratigraphy and provenance of strata along the San Marcos fault, central Coahuila, México*. *Geological Society of America Bulletin*, 102,593-614.

McKee, JW. , Jones, N. W., y Long, L. E., (1984).*History of recurrent activity along a major fault in northeastern México*, *Geology*, 12,103-107.

Miyakoshi , (1995). Tesis Doctoral (en japonés), Universidad de Hokaido.

Montalvo-Arrieta, J. C., Quintanilla, Y., Tamez, A., Meneses, M., y Ramos, (2005). Microzonation of Linares region (Northeast Mexico), based on geology and shear-wave velocity (V_{s30}). *Geofísica Intenacional*, 44, 331-340.

Montalvo-Arrieta, J. C., Gómez de León, H., Valdez-González, C. Nueva estación sísmica digital en el noroeste de México. *Revista de ingeniería, universidad Autónoma de Nuevo León*, Julio-Septiembre 2006, Vol. IX, No.32.

Montalvo-Arrieta, J. C., P. Cavazos, I. Navarro de León, Medina-Barrera F and Alva-Niño E., (2006) *Mapping V_{s30} site Classes in Monterrey, Northeast México*. Submitted to *Earthquake Spectra* September. (en revision)

Morikawa, H., K. Toki, S. Sawada, J. Akamtsu, K. Miyacoshi, J. Ejiri, D. Nakayima, (1998), *Detection of dispersion curves from microseisms observed at two sites*. The effects of Surface Geology on Seismic Motion, Irikura, Kudo, Okada and Sasatani (eds.), Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp 719-724.

Muehlberger, W.R. Belcher, R.C. y Goetz, L. K. (1978). Quaternary Faulting in Trans-Pecos Texas. *Geology*, 6, 337-340.

Natali, S.G., and Sbar, M.L., (1982). Seismicity in the epicentral region of the 1887 northeastern Sonora earthquake, Mexico, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 72, 181-196.

Nakamura, Y., (1989), "A method for dynamic characteristics estimation of surface using microtremor on the ground surface". *QR of R.T. r.*, 30-1.

Nava A., (1998). *Terremotos*. Fondo de Cultura Económica, Mexico. 1 58p.

Toksoz, M.N. (1964). "Microseism and an attempted application to exploration". *Geophysics*, 29, 154-177.

Okada, H. (1998). Microtremors as an exploration method, *Geo-exploration hand-book, Soc. Exploration Geophysicists of Japan* 2, 203-211.

Reinoso, E. (2000). "Estudios para la Microzonificación". *Memorias del VI Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica y II reunión sobre la Enseñanza de la Ingeniería Sísmica en México*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.

Singh S. K., Rodriguez M., and Esteva L., (1983), "Statistics of Small Earthquakes and frequency of Occurrence of large Earthquakes Along the Mexican Subduction Zone". *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 73 No. 6, pp 1779-1796.

Thomson, N.A.(1950),” *Transmission of elastic waves through a stratified solid medium*”, J. Appl Phys,21, 89-93 pp.

Padilla y Sánchez, R. J., (1982). Geologic evolution of the Sierra Madre Oriental between Linares, Concepción del Oro, Saltillo and Monterrey, Mexico, *Ph.D. Thesis. Austin, Texas, University of Texas* 217p.

Vázquez Rosas R, (2002),”Propuesta de microzonificación sísmica para la ciudad de Uruapan Michoacán”. *Tesis de licenciatura., Facultad de Ingeniería UMSNH Morelia Mich. Noviembre 2002.*

Vázquez Rosas R, (2003),”Propuesta de microzonificación sísmica para la ciudad de Uruapan Michoacán”. *Memorias del XIV Congreso Nacional De Ingeniería Sísmica, León, Guanajuato. Noviembre. Artículo II-08 (en extenso).*

Vázquez R. Ricardo, Aguirre González Jorge, Garduño M. Víctor H., Mijares A. Horacio. (2005),”Estudio de microtemores para la ciudad de Uruapan Michoacán aplicando el método SPAC” *Memorias del XV Congreso Nacional De Ingeniería Sísmica, México, D. F. septiembre. (en extenso).*

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

Xie, J., (1998). Spectral inversion of Lg from earthquakes: a modified method with applications to the 1995, Western Texas earthquake sequence, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 88, 1525-1537.

APENDICE 1.

Triángulo 1, Uruapan Michoacán.

En las figuras 1 muestra los espectros de potencia para las 21 ventanas de 81.92 s.

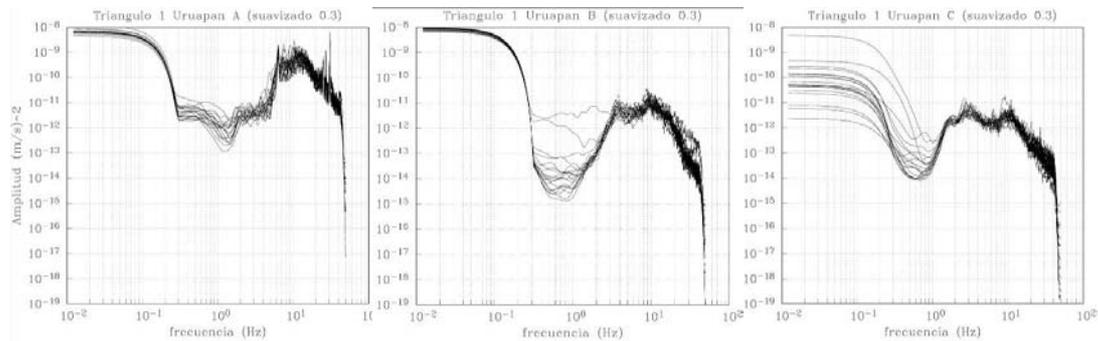


Figura 1. Espectros de potencia de todas las 21 ventanas de 81.92 s para los vértices A, B, C. mostrando el valor de las frecuencias Hz. en el eje horizontal y en el vertical muestra la amplitud en $(m/s)^2$.

En la figura 1 se observan los espectros calculados para las 21 ventanas de cada vértice. El vértice C y B muestran bastante dispersión en frecuencias bajas mientras que para el vértice A son más estables en frecuencias bajas.

En las siguientes figuras (2,3) mostramos las correlaciones cruzadas obtenidas para las 21 ventanas calculadas para este arreglo, de las cuales se seleccionaron todas aquellas que mejor correlación mostraban entre ellas y tuvieran el mismo cruce por cero. Dadas estas condiciones se espera obtener un buen coeficiente de correlación.

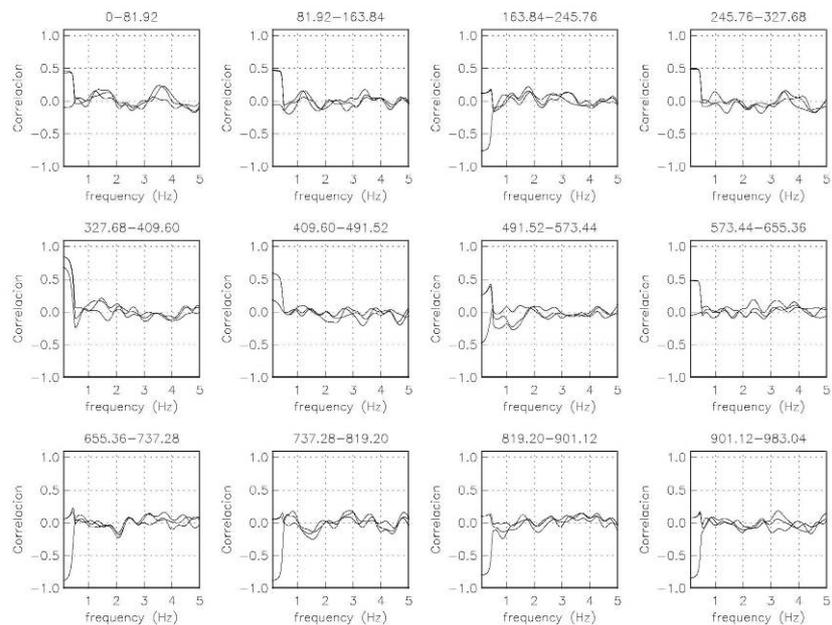


Figura 2 Correlaciones cruzadas para el arreglo 1, calculadas entre las tres estaciones para las 12 ventanas de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

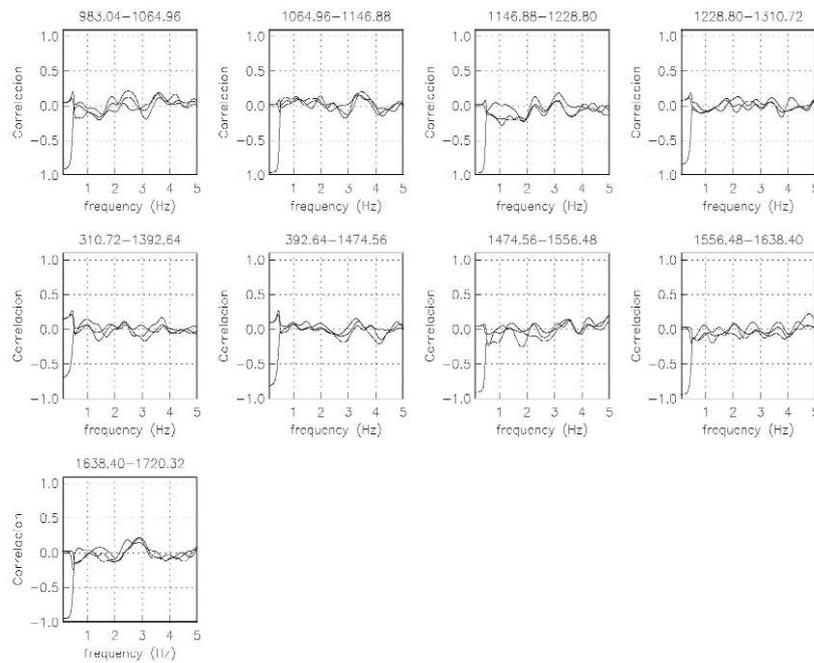


Figura 3. Correlaciones cruzadas para el arreglo 1, calculadas entre las tres estaciones para las 9 ventanas restantes de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

Triángulo 2, Uruapan Michoacán.

En el presente arreglo se muestran los espectros de potencia, de las 21 ventanas de 81.92 s de los vértices A, B y C (ver figura 4).

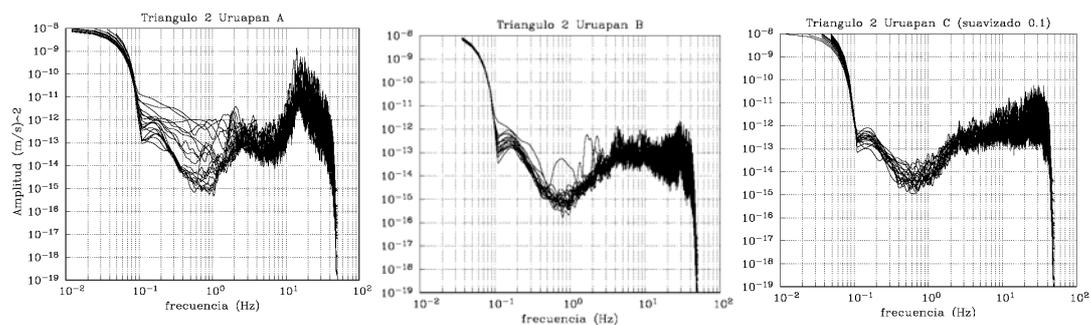


Figura 4. Espectros de potencia de todas las 21 ventanas de 81.92 s para los vértices A, B, C mostrando el valor de las frecuencias Hz. en el eje horizontal y en el vertical muestra la amplitud en $(m/s)^2$.

Los espectros obtenidos para las 21 ventanas se observa que para los vértices A y B muestran una dispersión hacia bajas frecuencias (entre 0.1 y 2 Hz) lo que es desfavorable para nuestro estudio en este arreglo, ya que lo que se pretende es trabajar hacia bajas frecuencias. Por otro lado observamos que en el vértice C no muestra una dispersión considerable con respecto a los otros dos vértices. A Esto se atribuye a que en los sitios A y B se tiene mayor efecto de las fuentes locales.

En las siguientes figuras 5 y 6 se ilustran las correlaciones cruzadas del arreglo 2 de Uruapan Michoacán, con 21 ventanas de 81.92 s. En la figura 23 se observan las primeras doce ventanas de correlación cruzada y en la figura 5 las 9 ventanas restantes de las correlaciones cruzadas obtenidas para este arreglo.

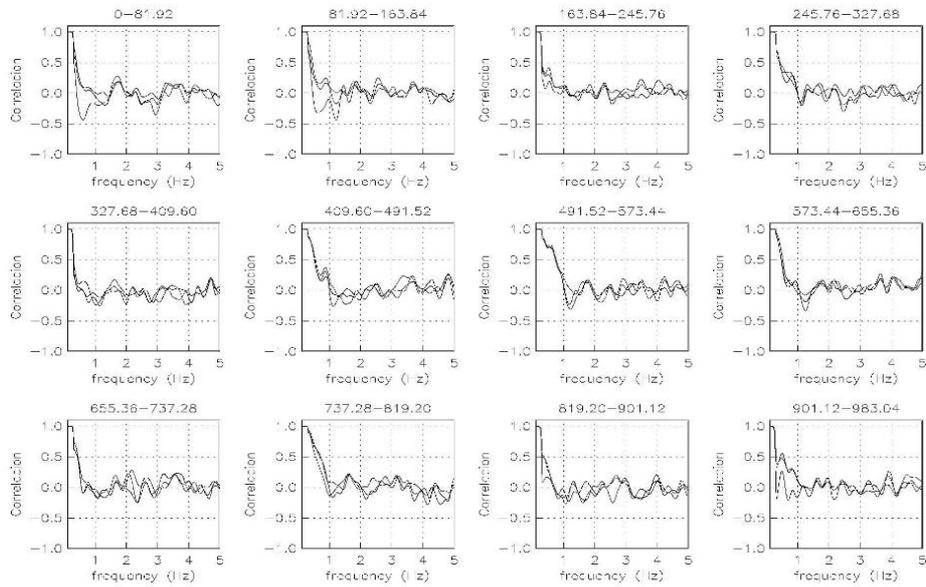


Figura 5. Correlaciones cruzadas para el arreglo 2, calculadas entre las tres estaciones para las 12 ventanas de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

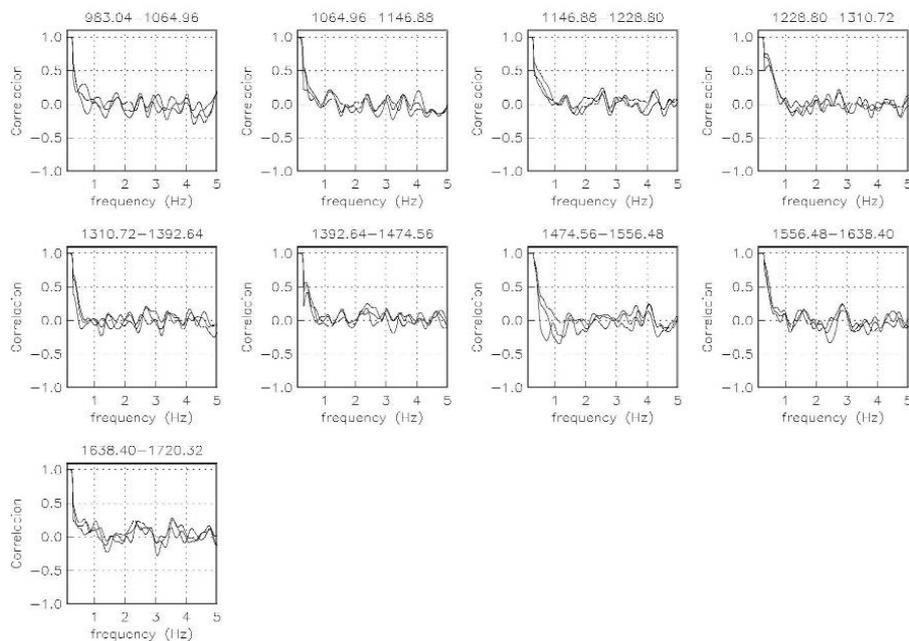


Figura 6. Correlaciones cruzadas para el arreglo 2, calculadas entre las tres estaciones para las 9 ventanas restantes de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

III.3.3 Triángulo 5, Uruapan Michoacán.

Este arreglo 5 es de 1km de distancia entre sus vértices. Como primera parte se ilustran los espectros de potencia calculados para las 21 ventanas (ver figura 7). Después se muestran los espectros de potencia para las ventanas seleccionadas para este arreglo en la figura 28.

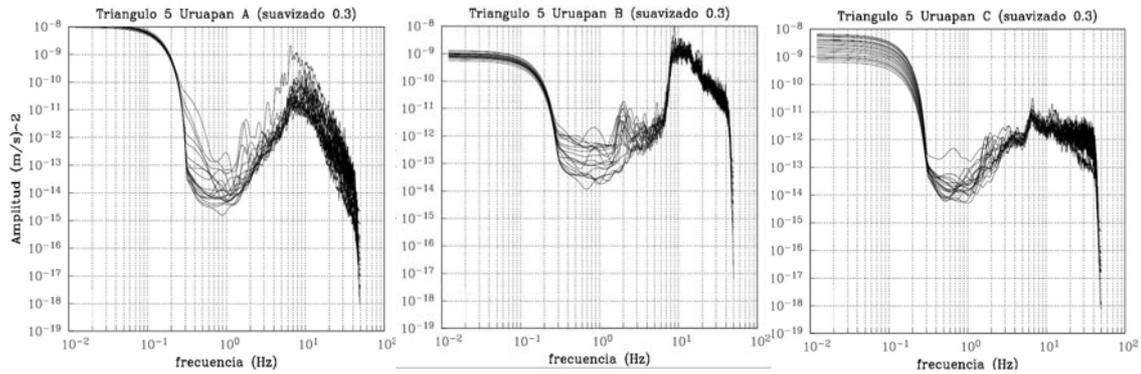


Figura 7. Espectros de potencia de todas las 21 ventanas de 81.92 s para los vértices A, B, C, mostrando el valor de las frecuencias Hz. en el eje horizontal y en el vertical muestra la amplitud en $(m/s)^2$.

En los espectros calculados, para las 21 ventanas de los tres vértices se observa que tienen dispersión hacia bajas frecuencias entre los tres vértices A, B y C. Por lo que se muestra, se observa que está afectado por las fuentes locales de cada uno de los sitios (es decir que se encuentran en zonas donde hay bastante actividad humana). Lo que nos puede causar en las correlaciones cruzadas dispersión entre ellas, y nos afecte al estudiar las frecuencias bajas.

Ahora se muestran las correlaciones cruzadas calculadas para las 21 ventanas del arreglo 5 de Uruapan Michoacán. En las siguientes figuras 8 y 9 se observan las correlaciones cruzadas entre los tres vértices en cada una de las ventanas.

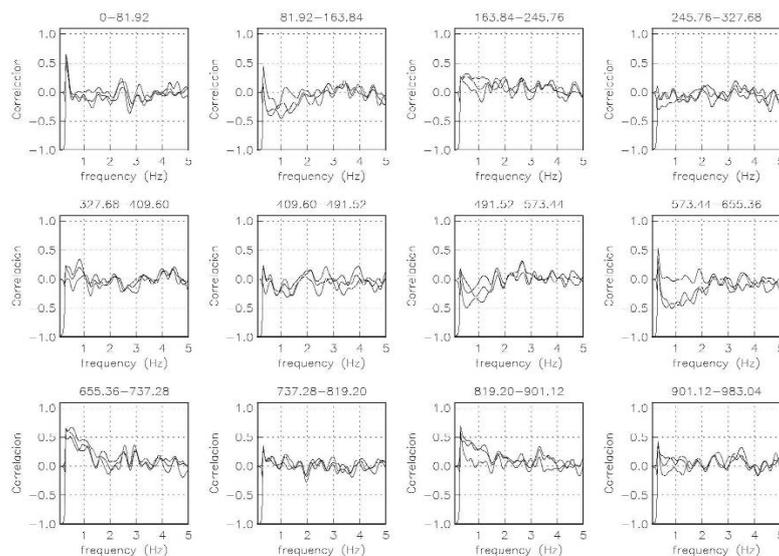


Figura 8. Correlaciones cruzadas para el arreglo 5, calculadas entre las tres estaciones para las 12 ventanas de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

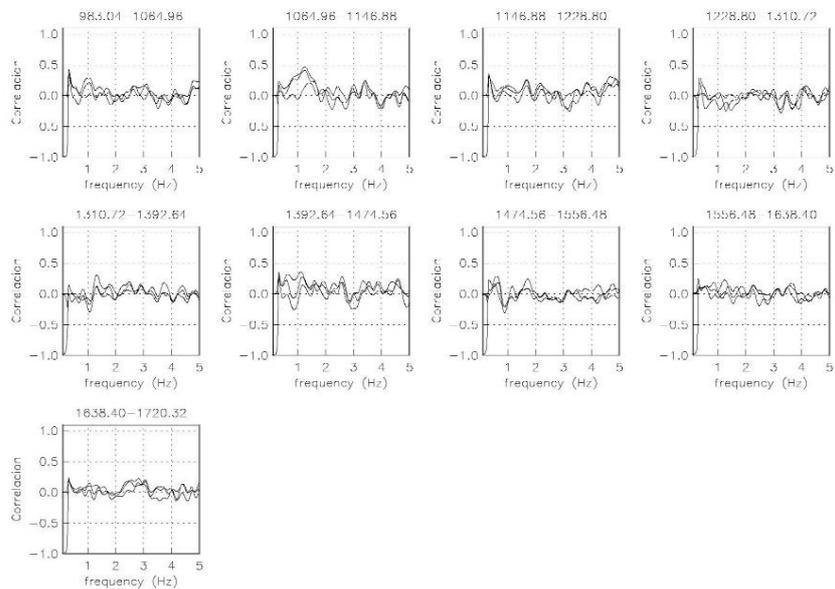


Figura 9. Correlaciones cruzadas para el arreglo 5, calculadas entre las tres estaciones para las 9 ventanas restantes de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

Triángulo 8, Uruapan Michoacán.

Para este arreglo la distancia entre sus vértices es de 1 km de distancia. Como primera parte se observan los espectros de potencia calculados para las 21 ventanas (ver figura 10). Después se muestran los espectros de potencia para las ventanas seleccionadas para este arreglo ver figura 10.

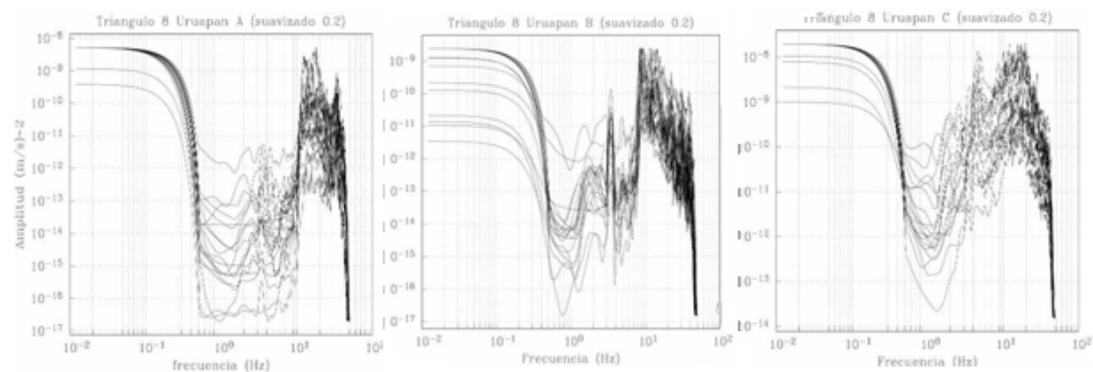


Figura 10. Espectros de potencia de todas las 21 ventanas de 81.92 s para los vértices A, B, C. mostrando el valor de las frecuencias Hz. en el eje horizontal y en el vertical muestra la amplitud en $(m/s)^2$.

En este sitio se observa que los espectros de potencia presentan bastante dispersión entre los tres vértices A, B y C, debido a que el sitio donde se encuentra el arreglo esta afectado por las condiciones físicas del lugar y también por la actividad humana.

Obtenidos los espectros se calcularon las 21 correlaciones cruzadas de todas las ventanas del arreglo 8 de Uruapan Michoacán, como se muestran en las figuras 11 y 12.

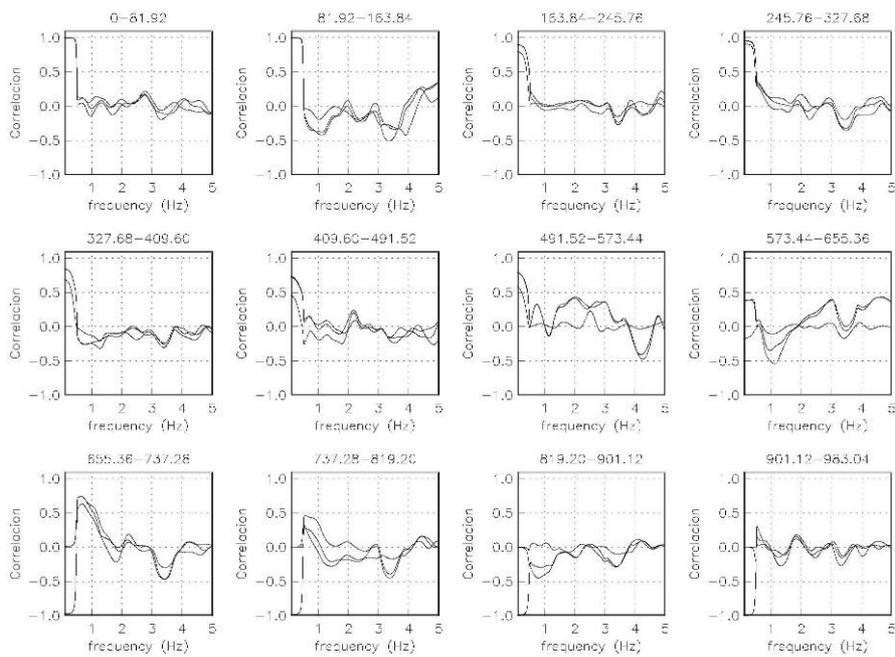


Figura 11. Correlaciones cruzadas para el arreglo 8, calculadas entre las tres estaciones para las 12 ventanas de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

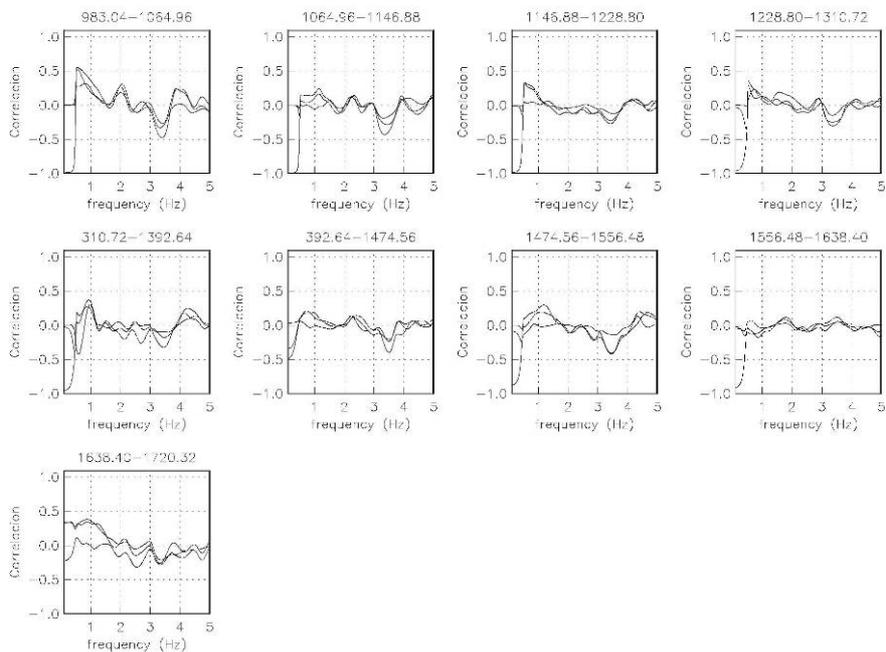


Figura 12. Correlaciones cruzadas para el arreglo 8, calculadas entre las tres estaciones para las 9 ventanas restantes de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

Triangulo 9 Uruapan Michoacán.

Para este arreglo la distancia entre sus vértices es de 950 m de distancia. En este arreglo se obtuvieron los espectros de potencia calculados para las 21 ventanas como se observa en la figura 13.

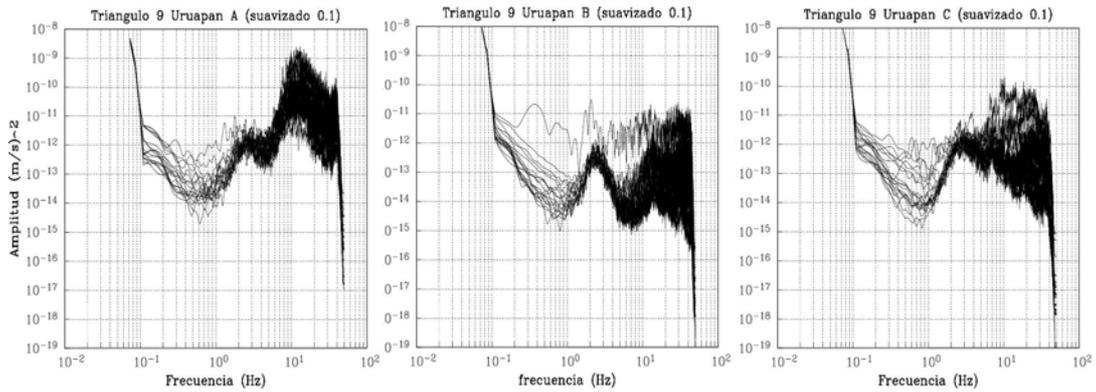


Figura 13. Espectros de potencia de todas las 21 ventanas de 81.92 s para los vértices A, B, C. mostrando el valor de las frecuencias Hz. en el eje horizontal y en el vertical muestra la amplitud en $(m/s)^2$.

Los espectros de potencia obtenidos para las 21 ventanas, en este sitio muestran dispersión en la mayoría de las ventanas esto se debe a que el sitio donde se ubico el arreglo se tenia actividad cultural cerca de los vértices de este arreglo. Nótese que los vértices A y C se observa una dispersión similar en bajas frecuencias. En el vértice B se ilustra que una ventana esta más afectada por fuentes locales mientras que el resto de las ventanas de este vértice, se ven con dispersión similar respecto a los otros dos vértices en el mismo rango de frecuencias.

En las figuras 14 y 15 se muestran las correlaciones cruzadas de las 21 ventanas obtenidas en este arreglo.

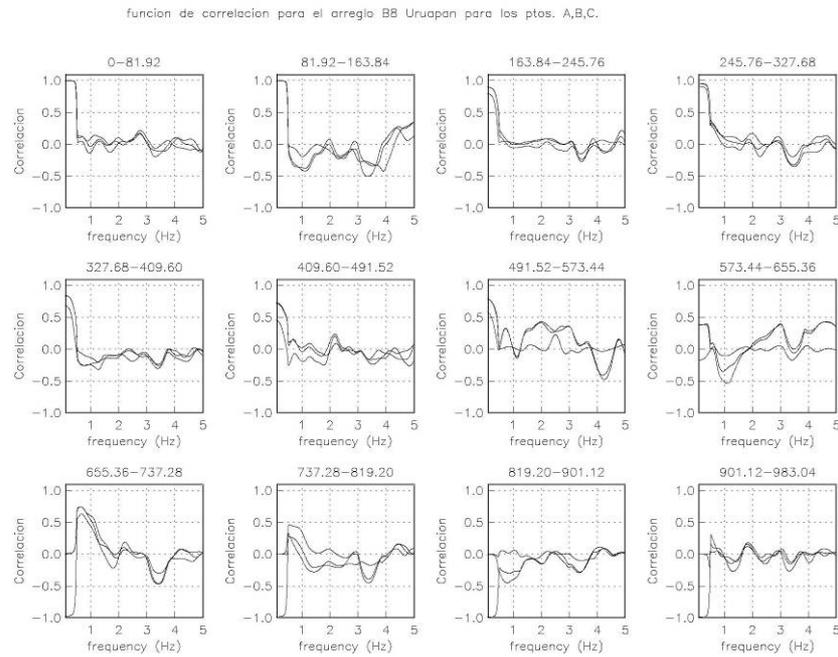


Figura 14. Correlaciones cruzadas para el arreglo 9, calculadas entre las tres estaciones para las 12 ventanas de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

funcion de correlacion para el arreglo B8 Uruapan para los pto. A,B,C.

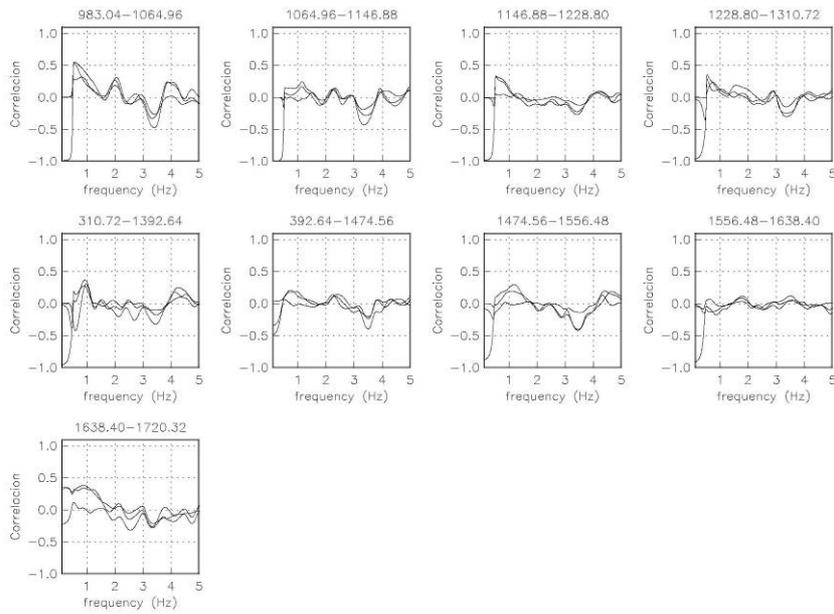


Figura 15. Correlaciones cruzadas para el arreglo 9, calculadas entre las tres estaciones para las 9 ventanas restantes de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

La mayoría de las correlaciones cruzadas muestran dispersión entre los tres vértices por lo que fueron descartadas. Una vez seleccionadas las ventanas de las correlaciones cruzadas entre los tres vértices se calcula el coeficiente de auto-correlación de las tres estaciones.

Triangulo 12 Uruapan Michoacán.

Para este arreglo la distancia entre sus vértices es de 1km de distancia. Como primera parte se observan los espectros de potencia calculados para las 21 ventanas de 81.92 s (ver figura 16).

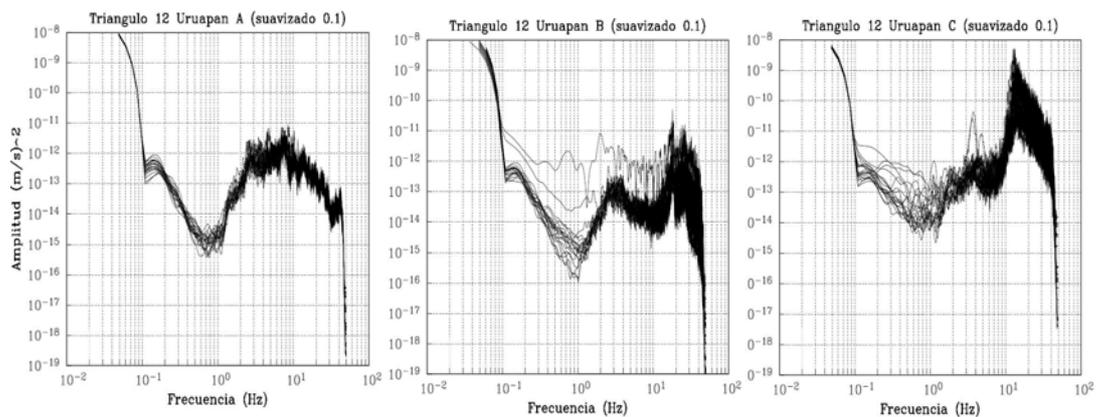


Figura 16. Espectros de potencia de todas las 21 ventanas de 81.92 s para los vértices A, B, C. mostrando el valor de las frecuencias Hz. en el eje horizontal y en el vertical muestra la amplitud en $(m/s)^2$.

En este arreglo se observa que en el vértice A, los espectros de potencia tienen buena similitud entre las 21 ventanas mostrándose estables hacia frecuencias bajas. Por otro lado se

ve que los vértices B y C, tienen poca dispersión en frecuencias bajas, debido a las fuentes locales en cada vértice.

En las figuras 17 y 18 se ilustran las correlaciones cruzadas del arreglo 12 de Uruapan Michoacán, con 21 ventanas de 81.92 s.

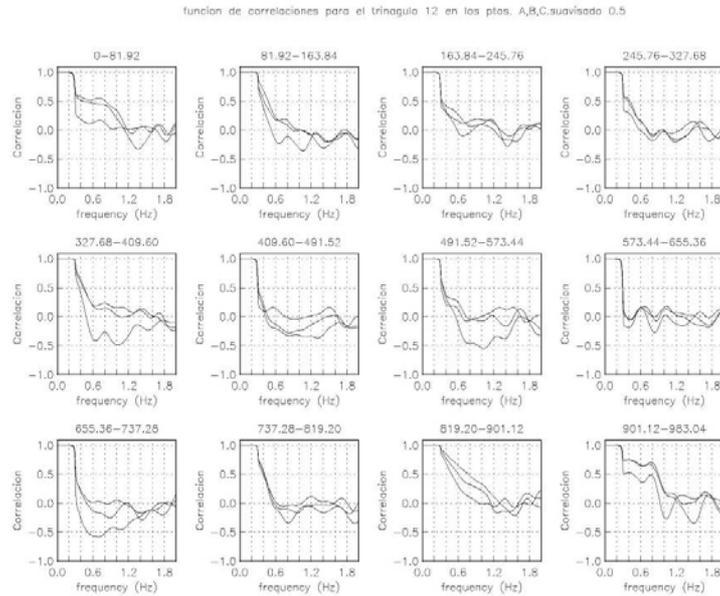


Figura17. Correlaciones cruzadas para el arreglo12, calculadas entre las tres estaciones para las 12 ventanas de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

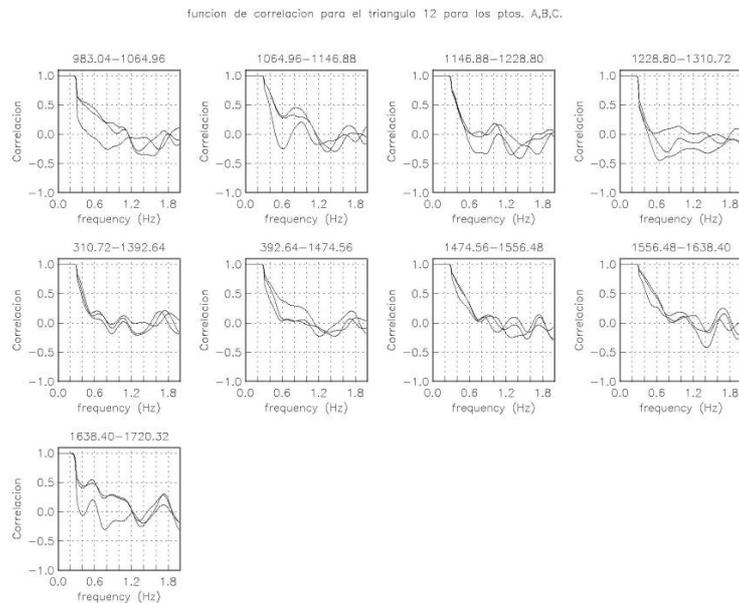


Figura18. Correlaciones cruzadas para el arreglo12, calculadas entre las tres estaciones para las 9 ventanas restantes de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

Triángulo 14 Uruapan Michoacán.

Este arreglo tiene una distancia entre sus vértices de 1km. La figura 19 muestra los espectros de potencia calculados para las 21 ventanas de 81.92 s.

En los espectros de potencia obtenidos para los tres vértices de 81.92 s se observa que tienen dispersión en el rango de frecuencias de 0.3 hasta 2.0 Hz.

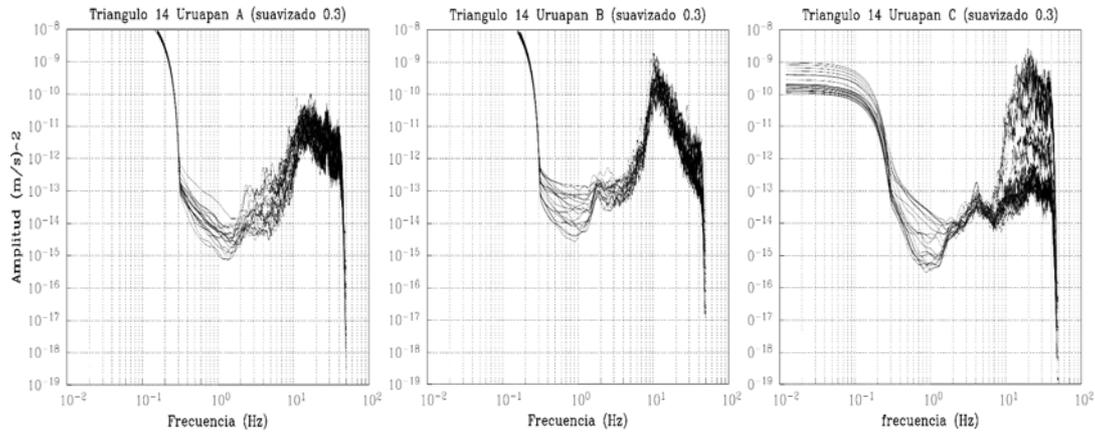


Figura 19. Espectros de potencia de todas las 21 ventanas de 81.92 s para los vértices A, B, C. mostrando el valor de las frecuencias Hz. en el eje horizontal y en el vertical muestra la amplitud en $(m/s)^2$.

En la siguiente figura se muestran las correlaciones cruzadas calculadas para el arreglo 14 de Uruapan Michoacán, con 4 ventanas de 81.92 s como se ilustran en las figura 20 y 21.

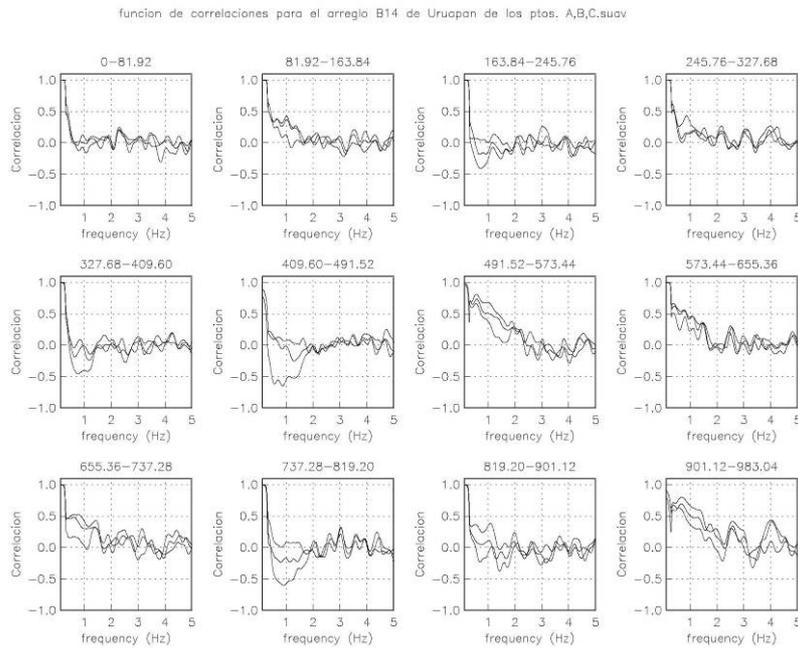


Figura 20. Correlaciones cruzadas para el arreglo14, calculadas entre las tres estaciones para las 12 ventanas de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

funcion de correlacion para el arreglo B14 de Uruapan para los pto. A,B,C.

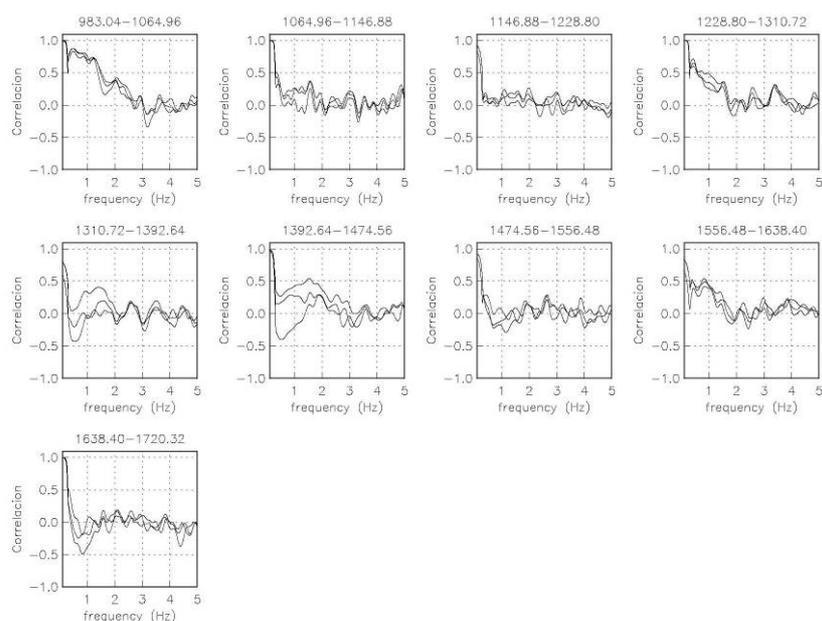


Figura 21. Correlaciones cruzadas para el arreglo14, calculadas entre las tres estaciones para las 9 ventanas restantes de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

Triángulo 3 Uruapan Michoacán.

Para este arreglo tiene una distancia entre sus vértices de 1 km. primero se grafican los espectros de potencia calculados para las 21 ventanas de 81.92 s (ver figura 57), y después se muestran los espectros de potencia para las ventanas seleccionadas para este arreglo ver figura 22.

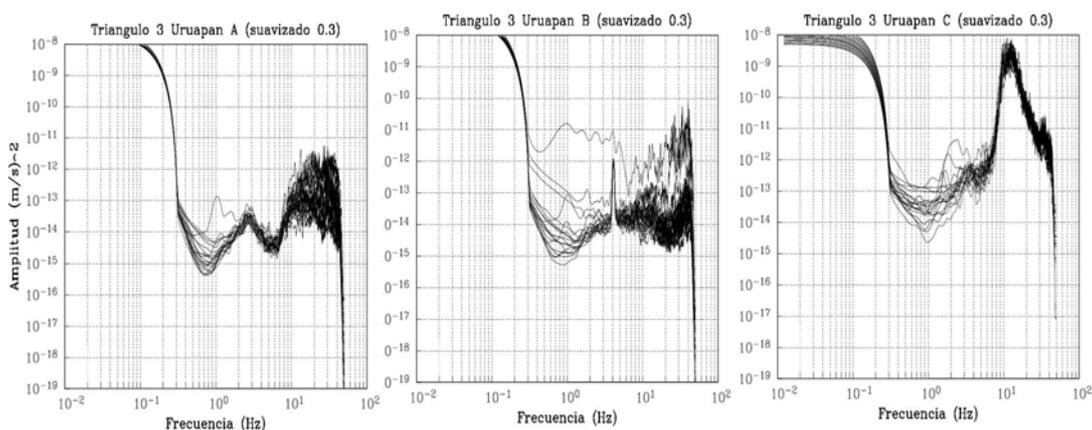


Figura 22. Espectros de potencia de todas las 21 ventanas de 81.92 s para los vértices A, B, C. mostrando el valor de las frecuencias Hz. en el eje horizontal y en el vertical muestra la amplitud en $(m/s)^2$.

En este sitio se observa que los espectros de potencia del vértice B muestran un pulso alrededor de 4 Hz para la mayoría de las ventanas, y presentan también dispersión en bajas frecuencias a partir de 0.3 Hz hasta 4 Hz. Esto solo se presenta en este vértice lo que probablemente fue afectado por una fuente local cerca de la estación de ese vértice.

En las siguientes figuras 23 y 24 se ilustran las correlaciones cruzadas calculadas del arreglo 3 de Uruapan Michoacán, con 21 ventanas de 81.92 s. Las cuales se seleccionaron todas

aquellas que mejor similitud tuvieran entre ellas y que tuvieran el mismo cruce por cero en el mismo rango de frecuencias.

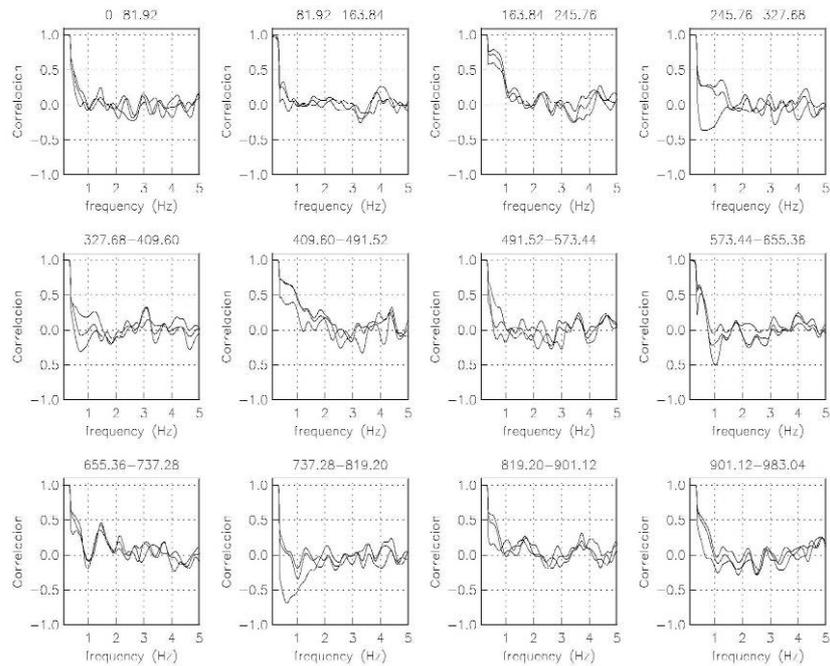


Figura 23. Correlaciones cruzadas para el arreglo14, calculadas entre las tres estaciones para las 12 ventanas de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

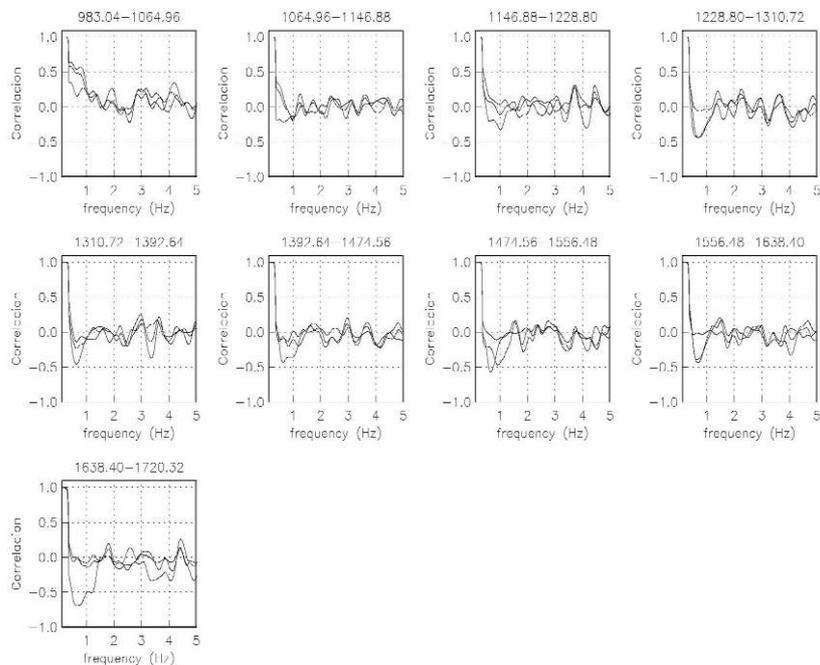


Figura 24. Correlaciones cruzadas para el arreglo14, calculadas entre las tres estaciones para las 9 ventanas restantes de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

Triángulo 10 Uruapan Michoacán.

Para este arreglo tiene una distancia entre sus vértices de 1km. primero se grafican los espectros de potencia calculados para las 21 ventanas de 81.92 s (ver figura 25).

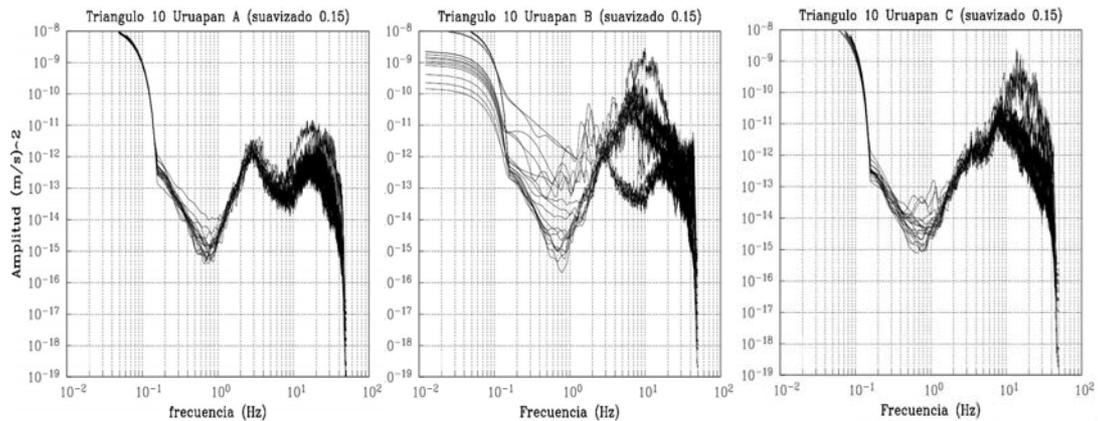


Figura 25. Espectros de potencia de todas las 21 ventanas de 81.92 s para los vértices A, B, C. mostrando el valor de las frecuencias Hz. en el eje horizontal y en el vertical muestra la amplitud en $(m/s)^2$.

En los espectros de potencia de los tres vértices mostrados en la figura 25. En el vértice B se observa que se tiene mucha dispersión entre los espectros de potencia de las 21 ventanas, calculadas tanto en altas y bajas frecuencias. Mientras que para los vértices A y C, en el rango de bajas frecuencias (0.3 a 2.0 Hz.) podemos observar dispersión en menos ventanas que el vértice B.

En las siguientes figuras 26 y 27 se ilustran las correlaciones cruzadas obtenidas para las 21 ventanas de este arreglo.

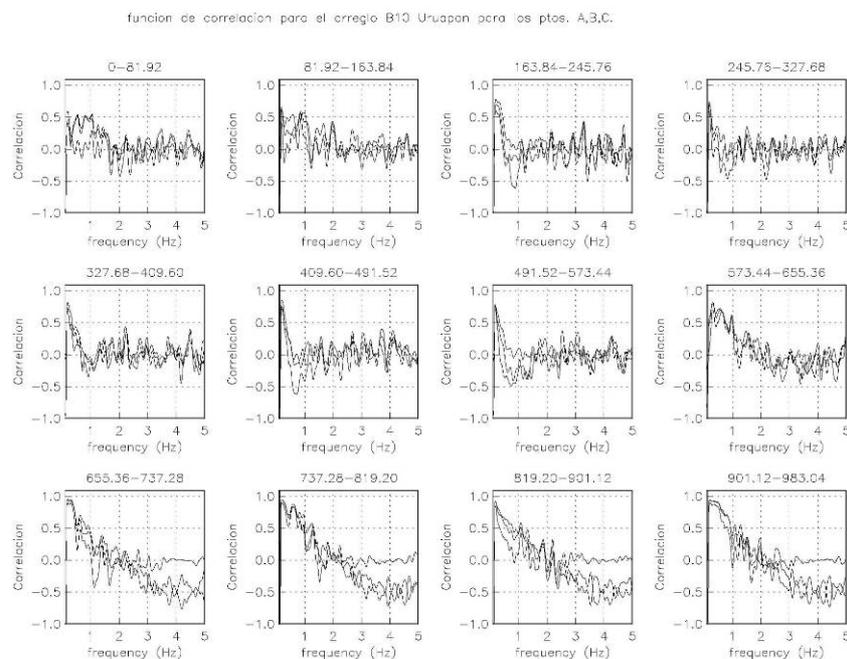


Figura 26. Correlaciones cruzadas para el arreglo14, calculadas entre las tres estaciones para las 12 ventanas de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

funcion de correlación para el arreglo B10 Uruapan para los pto. A,3,C.

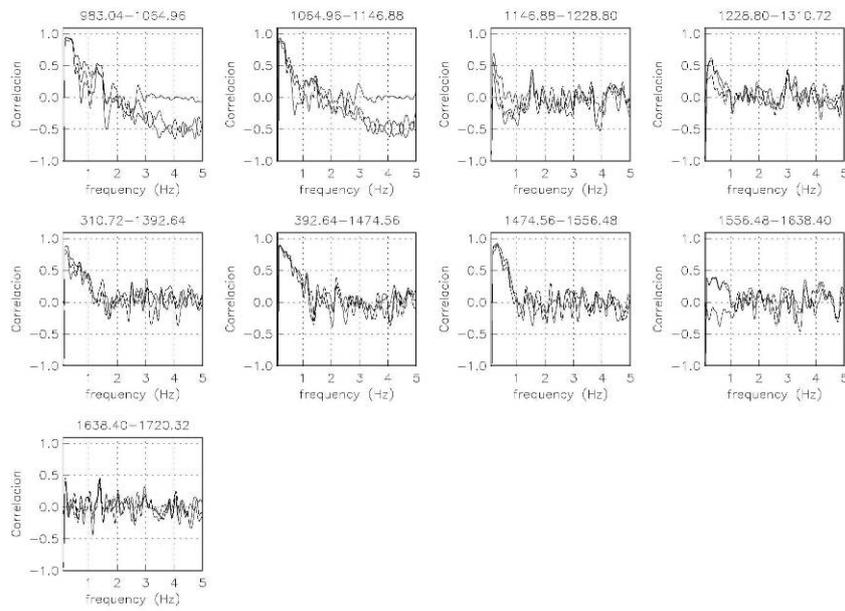


Figura 27. Correlaciones cruzadas para el arreglo10, calculadas entre las tres estaciones para las 9 ventanas restantes de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

Triángulo 15 Uruapan Michoacán.

Este arreglo tiene una distancia entre sus vértices de 1Km. se presentan los espectros de potencia calculados para las 21 ventanas de 81.92 s (ver figura 28).

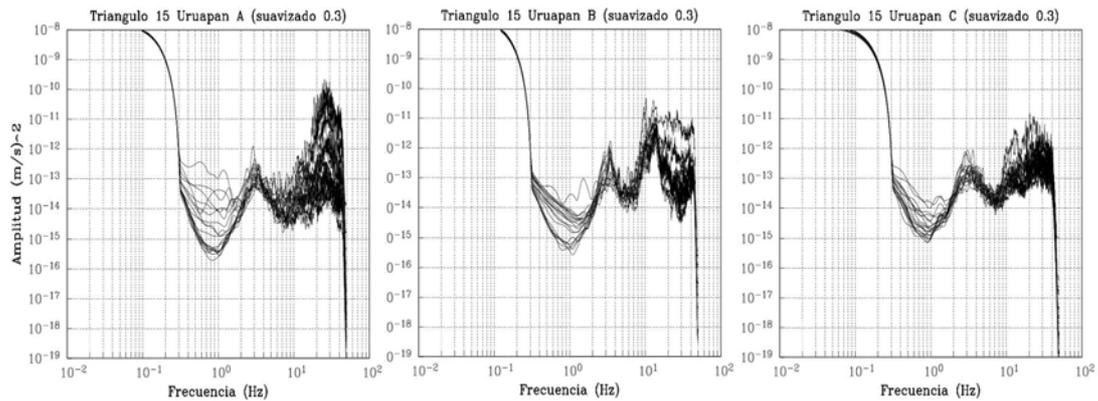


Figura 28. Espectros de potencia de todas las 21 ventanas de 81.92 s para los vértices A, B, C. mostrando el valor de las frecuencias Hz. en el eje horizontal y en el vertical muestra la amplitud en $(m/s)^2$.

Después calcular los espectros de potencia, se calcularon las correlaciones cruzadas de las 21 ventanas en el arreglo 15 de Uruapan Michoacán, con 21 ventanas. De las cuales se seleccionaron todas aquellas que tenían buena correlación cruzada entre las tres estaciones y tuvieran el mismo cruce por cero como se muestran en las figuras 29 y 30.

función de correlaciones para el arreglo B15 de Uruapan de los pto. A,B,C,sucv

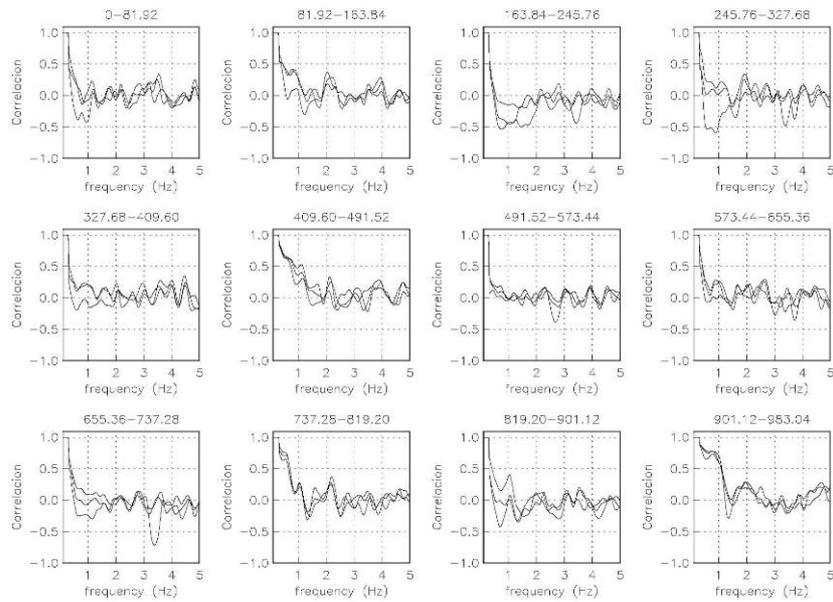


Figura 29. Correlaciones cruzadas para el arreglo15, calculadas entre las tres estaciones para las 12 ventanas de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

función de correlación para el arreglo B15 de Uruapan para los pto. A,B,C.

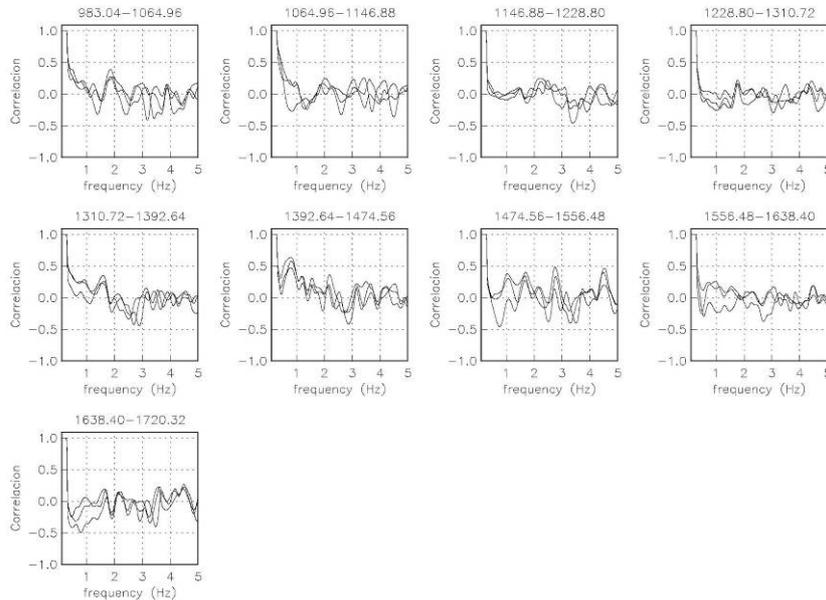


Figura 30. Correlaciones cruzadas para el arreglo15, calculadas entre las tres estaciones para las 9 ventanas restantes de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

Triángulo 17 Uruapan Michoacán.

En la figuras 31 se observan los espectros de potencia calculados para el arreglo 17. Esta presenta los espectros de potencia para las 21 ventanas de 81.92 s.

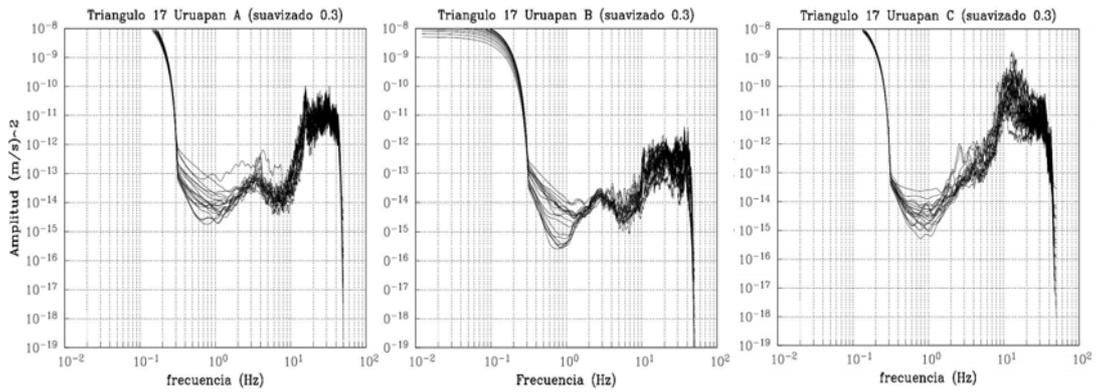


Figura 31. Espectros de potencia de todas las 21 ventanas de 81.92 s para los vértices A, B, C, mostrando el valor de las frecuencias Hz. en el eje horizontal y en el vertical muestra la amplitud en $(m/s)^2$.

En los espectros de potencia de las 21 ventanas de cada vértice (A, B, C) se observa que para el rango de frecuencias de nuestro interés menor a 1 Hz, se tiene que los espectros están muy dispersos. Lo que en este caso se le atribuye a las condiciones físicas (como la topografía y la actividad humana) del lugar donde se realizó este arreglo.

Después de calcular los espectros de potencia se calcularon las correlaciones cruzadas para las 21 ventanas del arreglo 17 de Uruapan Michoacán. De las cuales se seleccionaron todas aquellas que tenían buena correlación cruzada entre las tres estaciones y tuvieran el mismo cruce por cero.

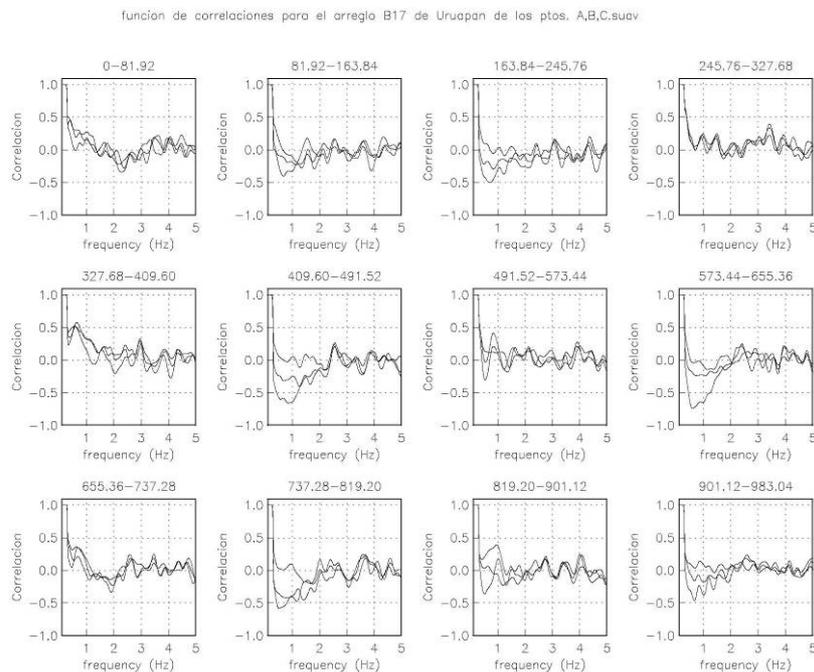


Figura 32. Correlaciones cruzadas para el arreglo15, calculadas entre las tres estaciones para las 12 ventanas de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

función de correlación para el arreglo B17 de Uruapan para los pto. A,B,C.

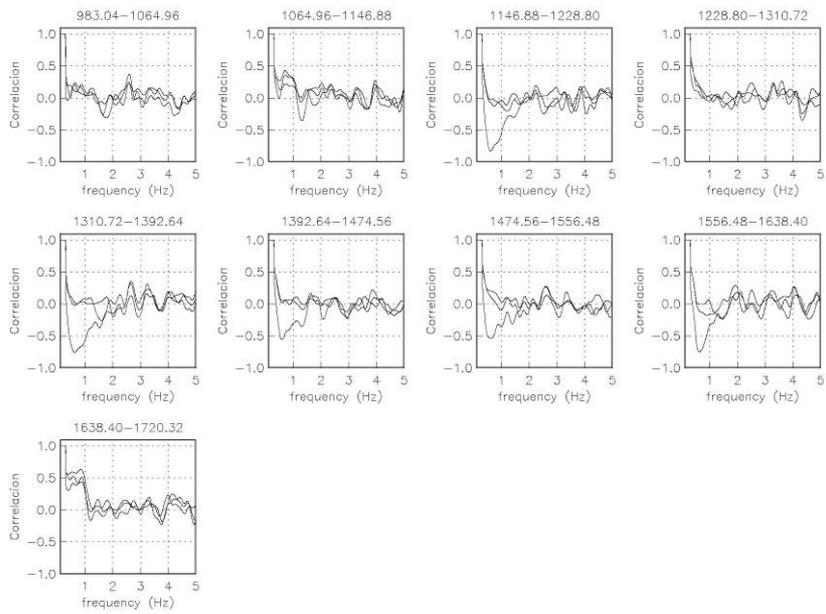


Figura 33. Correlaciones cruzadas para el arreglo17, calculadas entre las tres estaciones para las 9 ventanas restantes de 81.92 s indicando el tiempo de inicio de cada ventana en la parte superior de cada una de ellas.

APENDICE 2.

XIV CNIS



Artículo II-08

PROPUESTA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA PARA LA CIUDAD DE URUAPAN.

Ricardo Vázquez Rosas, Jorge Aguirre González, Horacio Mijares A. ⁽¹⁾, Víctor H. Garduño Monroy y Eleazar Arreygue Rocha ⁽²⁾

RESUMEN

En este trabajo se elabora una propuesta de un mapa de curvas de isoperiodos de la ciudad de Uruapan. Fue obtenido mediante el análisis de vibración ambiental (microtremores) registrados en 54 sitios, 3 estaciones semi-permanentes que registraron eventos sísmicos, así como también la información geotécnica, geológica y topográfica existente. Con los cocientes espectrales (H/V) de los microtremores observados se pudieron obtener las frecuencias pico usando el método de Nakamura. En general las frecuencias pico se localizaron alrededor de $f = 4.8$ Hz teniendo periodos máximos de alrededor de $T = 0.6$ s. y mínimos de $T = 0.10$ s.

ABSTRACT

In this work a proposal for the isoperiods map of Uruapan city is elaborated. It was obtained by the analysis of the environmental vibration (microtremors) recorded in 54 places, 3 semi-permanent stations that recorded seismic events, as well as the existent geotechnical, geological and topographical information. With the spectral ratio (H/V) of the observed microtremors the pick frequencies could be obtained by the Nakamura's method. In general the pick frequencies were located around $f = 4.8$ Hz having maximum periods of around $T = 0.6$ s. and minima of $T = 0.10$ s.

INTRODUCCION

La ciudad de Uruapan Michoacán se localiza al oeste del estado de Michoacán ($19^{\circ}25'00''$; $102^{\circ}04'00''$) a una altura de 1,600 metros sobre el nivel del mar. Su superficie es de 830.28 kilómetros cuadrados y representa el 1.39 por ciento del total del estado. Es una de las mas importantes dentro de nuestro estado ya que ha tenido un gran desarrollo en cuanto a población y vivienda.

El Estado de Michoacán forma parte de una de las zonas con mas alta sismicidad de nuestro país, donde se han generado sismos históricos de más de 8.0 grados de magnitud (Jara y Sánchez, 2001) por lo que se realizó una recopilación histórica desde 1882 y 1943.

En el estado, se tienen tres fuentes potenciales de generación de sismos:

-
- (1) Coordinación de Ingeniería Sismológica, Instituto de Ingeniería, UNAM. Ciudad Universitaria. Apdo. postal 70-472, Coyoacán, 04510 México DF. RvazquezR@iingen.unam.mx, joagg@pumas.iingen.unam.mx
 - (2) Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, UMSNH. Ciudad Universitaria, edificio U, Morelia Michoacán. vgmonroy@zeus.unimich.mx, arrocha@zeus.unimich.mx

Los generados por la actividad Volcánica (como los sismos que se produjeron en las erupciones de los volcanes Jorullo en 1759 y Parícutín en 1943).

Los generados por la Tectónica.

- Subducción : sismos producidos por al Placa de Cocos, estos sismos ocurren a profundidades de entre 10 y 30 Km. aproximadamente como ejemplo podemos mencionar los sismos de, 1979 (M 7.4) y 1985 (8.1).

- Intraplaca (rompimiento de litósfera oceánica subducida) : son producto de la subducción pero con epicentro dentro de la placa oceánica bajo el continente. Son sismos poco frecuentes y a mayores profundidades (alrededor de 60 Km.) donde la placa comienza a fundirse, pero que pueden causar grandes daños.

- Fallas Locales (intraplaca dentro de la placa continental). Puesto que los sismos producto de las fallas locales son focos superficiales, esto provoca que la energía liberada, producto de un evento de este tipo incida casi directamente (por ejemplo Falla de Acambay 1912, M=7.0)

Y eventualmente los artificiales (por ejemplo construcción de presas).

Por lo cual es importante tener conocimiento de como se va a comportar el suelo ante un evento sísmico, ya que en la actualidad no se conocen los parámetros de seguridad de riesgo sísmico de cada ciudad, por lo que, los reglamentos de construcción se basan en el establecido para la ciudad de México.

GEOLOGÍA REGIONAL

La ciudad se desarrolla en una Zona de acumulación que forma parte de la cuenca del río Cupatitzio. Esta depresión genera que depósitos provenientes de los volcanes monogenéticos rellenen a esta depresión, donde de esta manera se reconocen de la base a la cima de esta ciudad, (ver fig.1). La ciudad de Uruapan se localiza en un límite sur del Cinturón Volcánico Mexicano, en una depresión que fue ocupada por el vulcanismo monogenético del corredor tarasco, este esta descansando sobre rocas graníticas que afloran a pocos kilómetros al sur de la ciudad. (ver fig. 1).

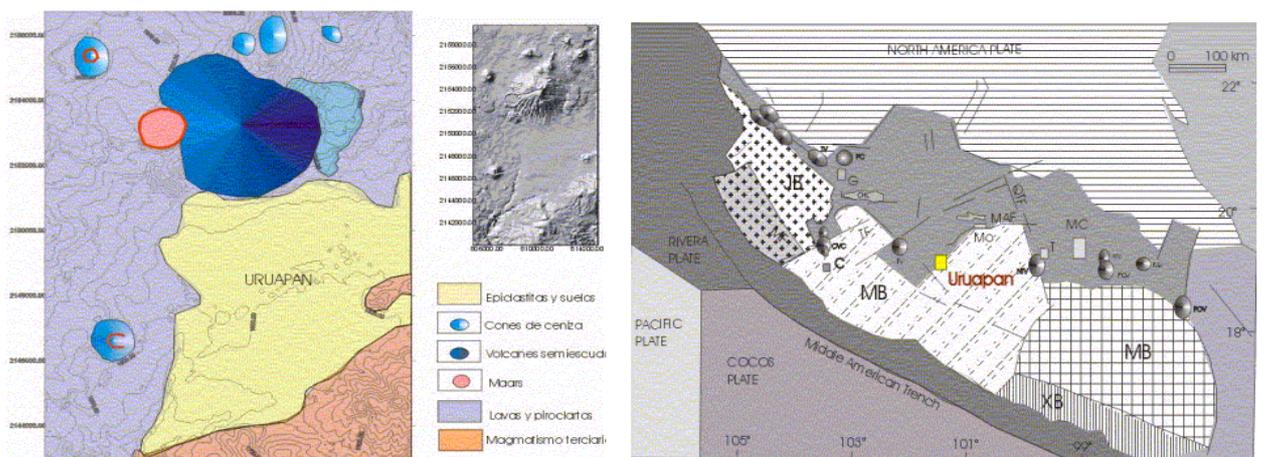


Figura 1. Geología de la ciudad de Uruapan (izquierda) y ambiente tectónico regional .

REVISIÓN HISTÓRICA DE LA SISMICIDAD DE URUAPAN (1858 – 1943)

En este párrafo se describen algunos datos históricos de eventos sísmicos que se han sentido en la ciudad de Uruapan (García y Suárez, 1996).

19 de junio de 1858, Uruapan, Terremoto espantoso, 9:05 am. Donde el sacudimiento causó fuertes daños de templos y casas y varias desgracias personales.

19 de Julio de 1882. Uruapan, Temblor de Trepidación. De (...) 1 a 2:25 pm.

9 de Febrero de 1886. Uruapan, Temblor de Oscilación de Sur a Norte. De 3:30 am, fuerte sacudimiento, por espacio de 2 segundos. Después se repitió media hora.

12 de Noviembre de 1891. Uruapan, Fuerte Temblor Oscilatorio de SE a NE. de 10: 11 am. Con duración de 3 segundos.

16 de Marzo de 1895. Uruapan, 2 Temblores uno de Trepidación y otro Oscilatorio con intervalos de segundos.

5 de Abril de 1895, (...) Fuerte temblor oscilatorio S a N. entre 2: 30 y 3.00 am. con duración de 3 y 4 segundos que repitió como a los 5 segundos.

18 de Enero de 1906, Uruapan, Temblor Trepidatorio, de 12:15 pm. con una duración de 5 segundos y prolongados ruidos subterráneos.

20 de Agosto 1906, Uruapan, Temblor Oscilatorio y Trepidatorio dirección NO a SE, a las 11:54 pm. con duración de 25 segundos.

14 de Abril de 1907, Uruapan, Temblor Oscilatorio de NS, a las 00:35 am.

12 de Mayo de 1910, Uruapan, Temblor Oscilatorio NO-SE duración de 55 segundos.

7 de Junio de 1911, Uruapan, Temblor Oscilatorio NS con una duración de 2 minutos y M=4 causó varios desperfectos en algunos edificios.

31 de Enero de 1912, Uruapan Temblor Oscilatorio, con una duración de 8 segundos.

14 de Febrero de 1943, sentidos ligeros en Uruapan (...).

23 de Marzo de 1943, Uruapan Temblor Oscilatorio sentido fuerte.

ANTECEDENTES LOCALES DE URUAPAN MICHOACÁN

Localización: Se localiza al Oeste del estado a una altura de 1,600 m sobre el nivel del mar. Su superficie es de 830.28 Km² y representa el 1.39% de total del estado.

Su Población y Vivienda.

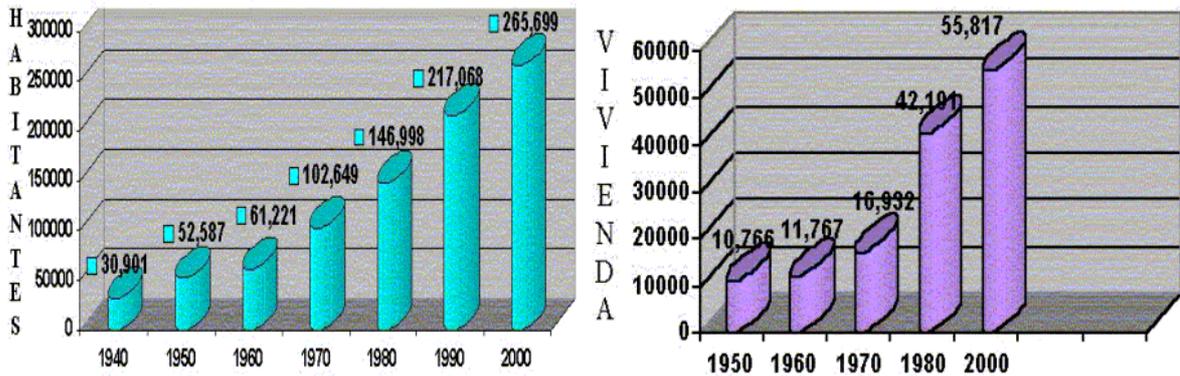


Figura 2. Crecimiento de población y crecimiento de vivienda (INEGI,2001).

La ciudad de Uruapan es una de las ciudades mas importantes del estado de Michoacán, ya que ha tenido un gran crecimiento en cuanto a población y vivienda. Como podemos observar en la fig. 2 es muy clara la diferencia de población entre 1980 y 2000 que es de 119000 habitantes y equivale a un crecimiento poblacional del 80.95 % en 20 años. Mientras que en vivienda se tiene registrada del año 1970 al 2000, una diferencia de 38,885 viviendas que representaría el 229.65 % de crecimiento de vivienda en 30 años.

MÉTODO DE NAKAMURA

Nakamura(1989) propuso un método para estimar lo que en su trabajo llamo “características dinámicas del suelo” a partir de registros de microtemores, argumentando su economía y la fácil adquisición. A partir de entonces este método se convirtió en uno de los mas utilizados a nivel mundial.

Siguiendo la metodología utilizada por Nakamura (1989), la función de transferencia de las capas superficiales se puede definir como el cociente:

$$ST = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (1)$$

donde: S_{HS} : es el componente horizontal del temror en la superficie.

S_{HB} : es el componente horizontal del temror en el substrato.

Se asume que el componente vertical del temror refleja el efecto de las fuentes locales, que no es amplificado por las capas superficiales, y que el efecto de las ondas Rayleigh (E_S) puede ser estimado por el cociente:

$$E_S = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (2)$$

donde: S_{VS} : es el componente vertical del temror en la superficie,

S_{VB} : es el componente vertical del temror en el substrato.

Si $E_s = 1$, no existe contribución de ondas Rayleigh; y si E_s es mayor que 1, el efecto de las ondas Rayleigh también es mayor.

Por lo que es una función de transferencia del sitio sin efecto de las ondas de Rayleigh, estaría dada por el cociente .

$$S_{TT} = \left(\frac{S_{HS}}{S_{VS}} \right) / \left(\frac{S_{HB}}{S_{VB}} \right) = \frac{R_S}{R_B}$$

(3)

Nakamura (1989) calcula el cociente R_B en dos estaciones que cuentan con datos de pozos y afirma que es $\cong 1$, por lo que define la función de transferencia del sitio $S_{TT} \cong R_S$.

$$S_{TT} \cong \frac{S_{HS}}{S_{VS}}$$

(4)

APLICACIÓN DEL METODO DE NAKAMURA

Este método se aplicó con el fin de encontrar la frecuencia fundamental del suelo en la ciudad de Uruapan. Con el fin de obtener mejores resultados, se probaron distintas posibilidades para considerar los datos y los cocientes espectrales, y se comparan de una manera estadística los resultados. También se analizaron las ventanas de registro de 30 minutos para obtener una mejor definición de los cocientes espectrales hacia bajas frecuencias.

Se realizaron mediciones de vibración ambiental en 54 sitios de la ciudad de Uruapan Michoacán (fig. 3) con el propósito de obtener el periodo de vibración del suelo. También se dejaron grabando dos estaciones fijas, que estuvieron registrando durante un mes, una en roca y otra en suelo blando. Con esta información se trazaron las curvas de isoperiodos.

Los equipos que se utilizaron para medir la vibración ambiental fueron sensores de banda ancha GURALP de 3 canales conectados a digitalizadores REFTEK que cuentan con una antena de GPS. En las estaciones fijas se instalaron dos acelerómetros K2, cada uno con una antena de GPS.

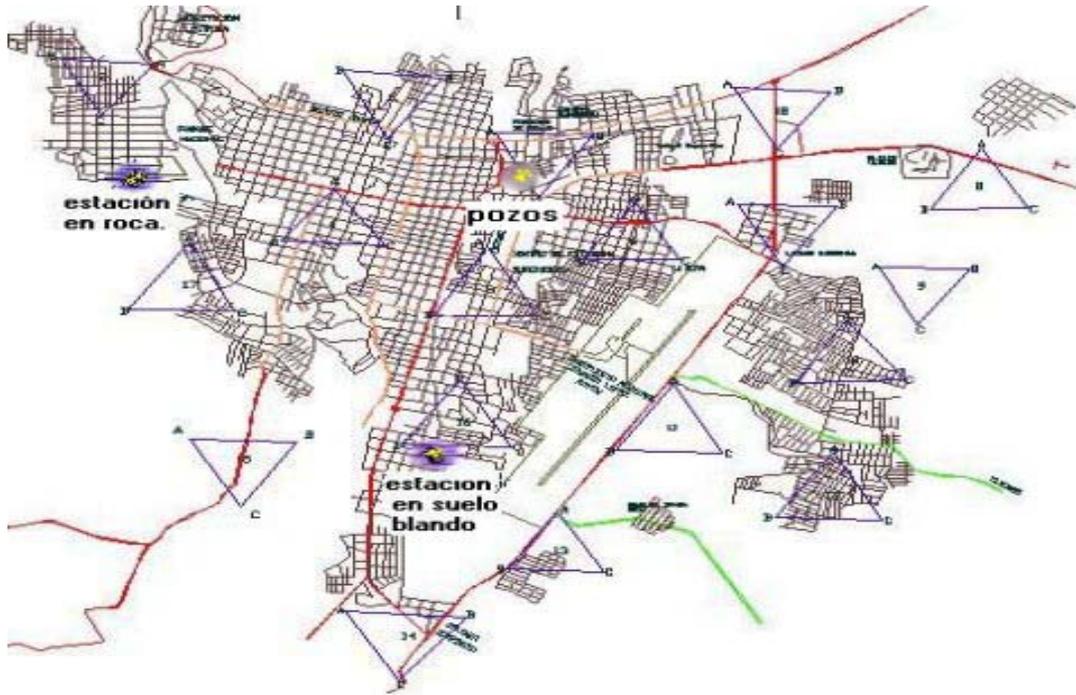


Figura 3. Mapa de la ciudad de Uruapan Michoacán representando la ubicación de los sitios de estudio junto con la ubicación de las estaciones fijas.

Una vez obtenidos los registros de microtremores que se grabaron en formatos binarios, se utilizó unas de las utilerías del programa pascal, para unir las tres ventanas de registro de 10 minutos cada una, a fin de que se grabaran en forma consecutiva. Luego se pasaron de formato binario a formato ASCII, para visualizarlas en MATLAB.

Las ventanas que se obtuvieron de 10 minutos equivalen a 600 segundos por lo que al unir las obtuvimos ventanas de 1800 segundos (ver fig. 4) de grabación, que es el equivalente a 180×103 muestras.

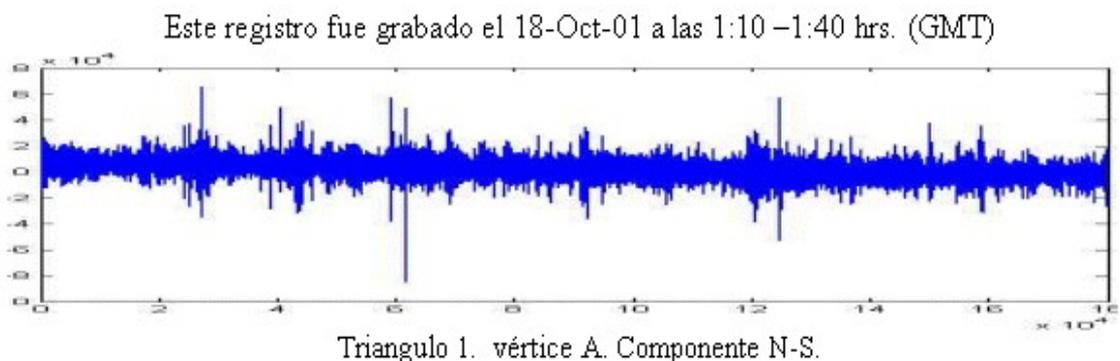


Figura 4. Ejemplo del registro de microtremor observado en el vértice A del triangulo 1, componente NS. En este registro se muestran los 1800 segundos registrados en el tiempo de las tres ventanas, de esta manera se obtuvieron para los 54 vértices de los triángulos.

Al obtener un número grande de muestras nos permite tener resultados mas confiables desde el punto de vista estadístico. Por lo que con la longitud de estos registros se pudieron realizar los análisis en varias ventanas de tiempo.

Para aplicar el método de Nakamura, se consideró necesario decidir que componente horizontal se tomaría en cuenta para calcular los cocientes espectrales, o bien, de que manera combinar el efecto de los componentes horizontales para calcular dichos cocientes ya que Nakamura (1989) no especifica en su trabajo qué componente horizontal utilizar para calcular los cocientes espectrales.

Hay que recordar que, cuando se trabaja con señales de microtemores es importante tomar en cuenta que las fuentes de energía son multidireccionales y por lo tanto, no se conoce la dirección de máximo movimiento. Esto permite esperar, que al considerar el vector de máxima energía horizontal, se obtengan amplitudes mayores (Flores, 2001). Por lo que los cocientes de H/V se calculan:

$$\frac{H}{V} = \frac{\sqrt{(NS(w))^2 + (EW(w))^2}}{V(w)}$$

(5)

Esto implica tomar una postura conservadora en cuanto a la evaluación de la amplitud de la amplificación del sitio (Flores, 2001).

Dadas estas consideraciones, en el programa de MATLAB se procede de la siguiente forma:

Se seleccionaron las once ventanas (de 40 segundos cada una) para cada estación.

Se realizó el suavizado de los bordes con las ventana de Von Hann (Kulhanek, 1976).

Se calculó la transformada de Fourier (FFT).

Se calculó la suma vectorial de los componentes horizontales en el dominio de las frecuencias.

Se calcularon los cocientes espectrales para las once ventanas.

Se obtuvo el promedio de los once cocientes espectrales y se calculó una desviación estándar.

Se gráfico el promedio resultante mas/menos una desviación estándar.

Obteniendo así los cocientes H/V de los 54 registros de microtemores como los ejemplos mostrados en las fig.5.

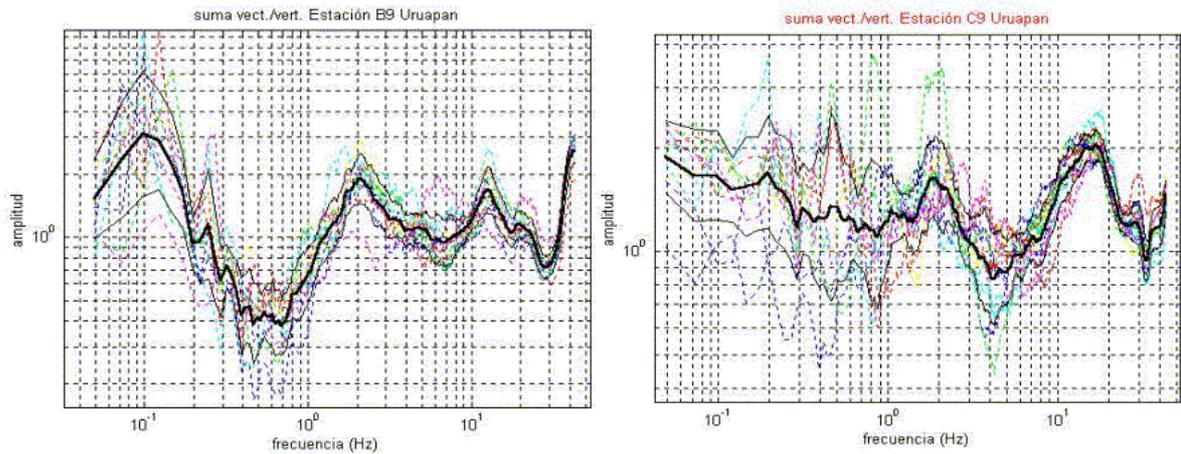


Figura 5. Cocientes espectrales H/V de la estación B9 y estación C9.

Para interpretar estos cocientes, nos apoyamos en los registros del evento ($M_s = 4.5$; Iris.2001), que se registró en las estaciones fijas (en roca y suelo blando) realizándose lo siguiente:

Se seleccionaron los eventos que se grabaron en las dos estaciones.

Se calculó la suma vectorial de las componentes horizontales.

Se hizo el cociente de la estación en suelo blando sobre la estación en roca, con la ec. 6.

$$FT = \frac{SV_S}{SV_R}$$

(6)

Adicionalmente se realizó un análisis considerando ventanas de 2026 muestras en diferentes tipos de onda de los registros obtenidos del sismo, se calcularon la FT para ventanas con:

Ondas de Preevento.

Ondas P.

Ondas Secundarias.

Ondas de Coda.

Donde se consideraron las componentes NS y EW tanto en suelo blando como en roca, usando la ec. 7. Se procedió de la siguiente manera;

Se calcula la suma vectorial de las componentes EW y NS.

$$FT = \frac{\sqrt{(EW_S)^2 + (NS_S)^2}}{\sqrt{(EW_R)^2 + (NS_R)^2}} \quad (7)$$

Se obtiene la suma de las componentes horizontales entre la componente vertical, usando las ecuaciones siguientes:

$$\frac{\sqrt{(EW_S)^2 + (NS_S)^2}}{V_S} \quad \text{para la estación en suelo blando} \quad (8)$$

$$\frac{\sqrt{(EW_R)^2 + (NS_R)^2}}{V_R} \quad \text{para la estación en suelo en roca} \quad (9)$$

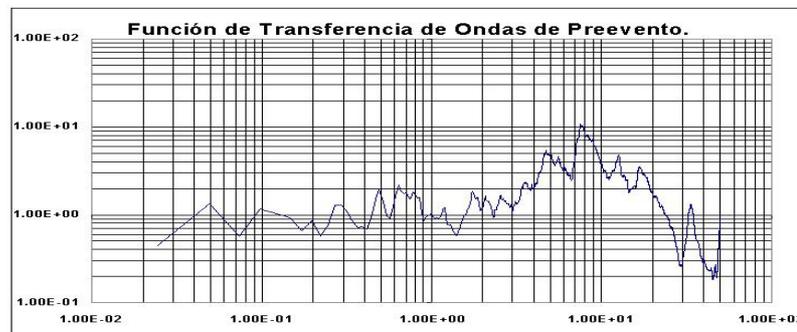
En resumen se calcularon las Funciones de Transferencia (Suelo blando/roca, SVs/SVR) como las que se muestran en la fig. 6. Así mismo los cocientes espectrales H/V de cada ventana y para cada estación, obteniendo así las gráficas de cocientes espectrales de (H/V) Ondas de Preevento, Ondas primarias, Ondas Secundarias, Ondas Coda en Roca y suelo blando (ver figs. 7 y 8).

RESULTADOS

Con los valores obtenidos en las FT se observó la frecuencia predominante $f_1 = 4.8$ Hz (ver tabla 1). Lo que nos llevo a considerar lecturas en los registros de microtremores H/V considerando frecuencias cercanas a $f_1 = 4.8$ Hz para sitios cercanos a la estación fija en suelo.

Tabla 1. Resultados de Cocientes Espectrales y FT del evento registrado.

	Valores de Cocientes Espectrales H/V (Hz)	Valores de FT (Hz.) S_S/S_R
Ondas de preevento.	4.5	4.8
Ondas Primarias	4.8	5
Ondas Secundarias	4.4	4.6
Ondas Conda	4.25	4.9



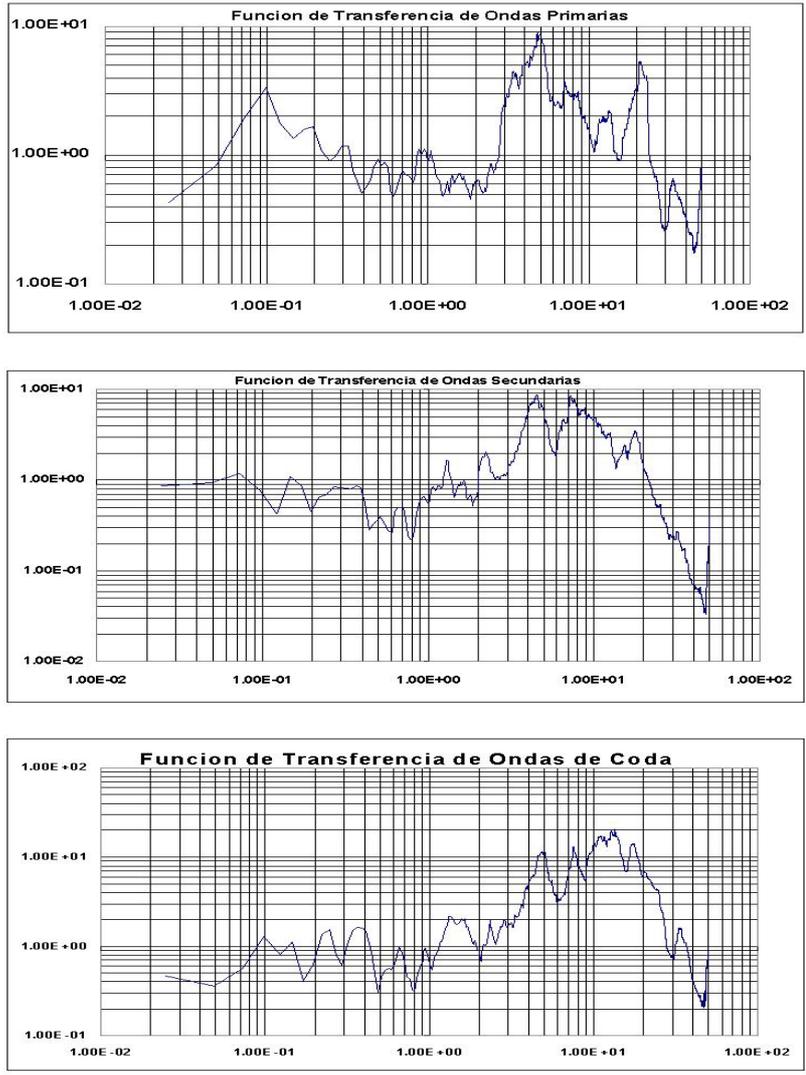
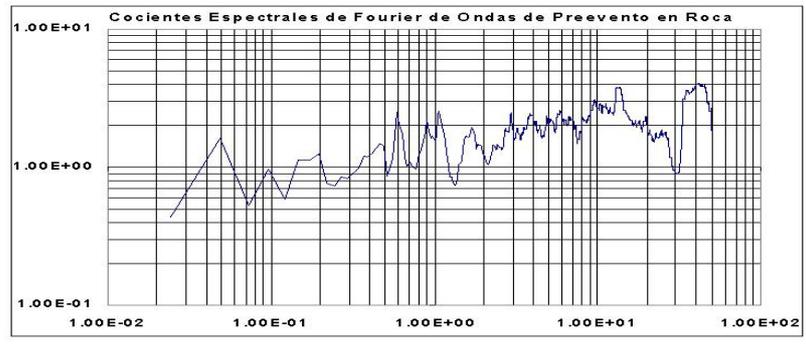


Figura 6. En la parte superior la función de transferencia (SV_s/SV_R) para la parte de preevento, en seguida para las ondas primarias, después para las ondas secundarias y en la parte inferior para las ondas de coda. El eje horizontal se gráfica en logaritmo de la frecuencia en Hz y en el vertical se gráfica el logaritmo de la amplitud (adimensional).



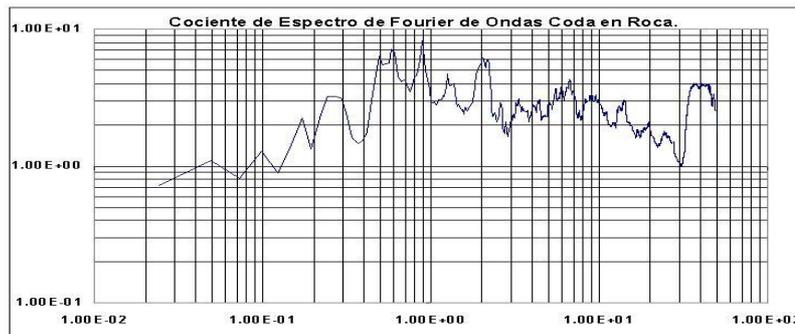
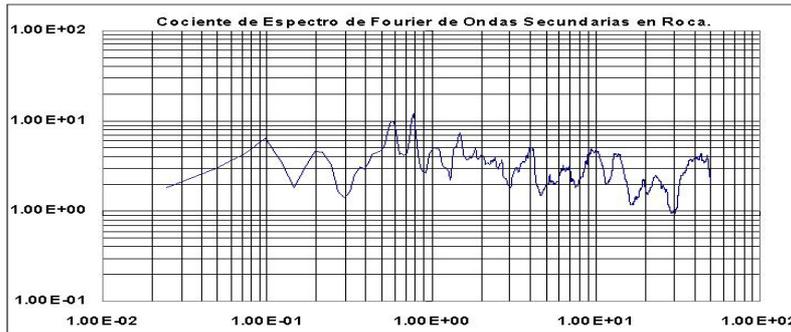
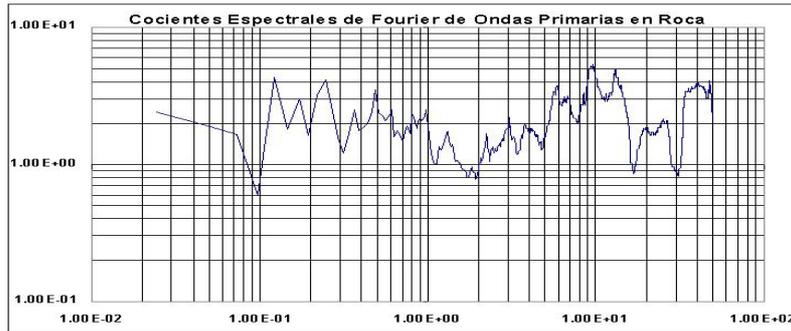
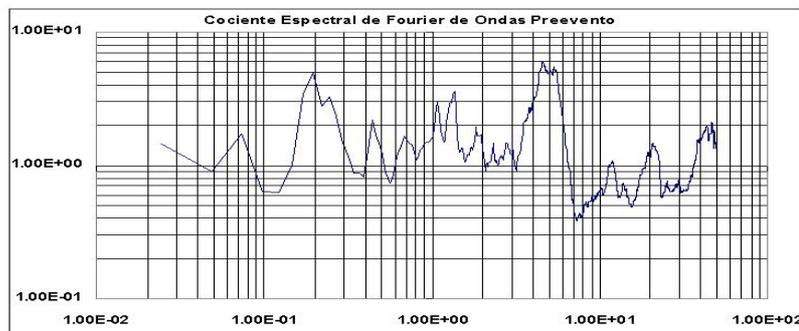


Figura 7. Cocientes espectrales para la estación en roca. En la parte superior el cociente H/V para la parte de preevento, en seguida para las ondas primarias, después para las ondas secundarias y en la parte inferior para las ondas de coda. El eje horizontal se gráfica en logaritmo de la frecuencia en Hz y en el vertical se gráfica el logaritmo de la amplitud (adimensional).



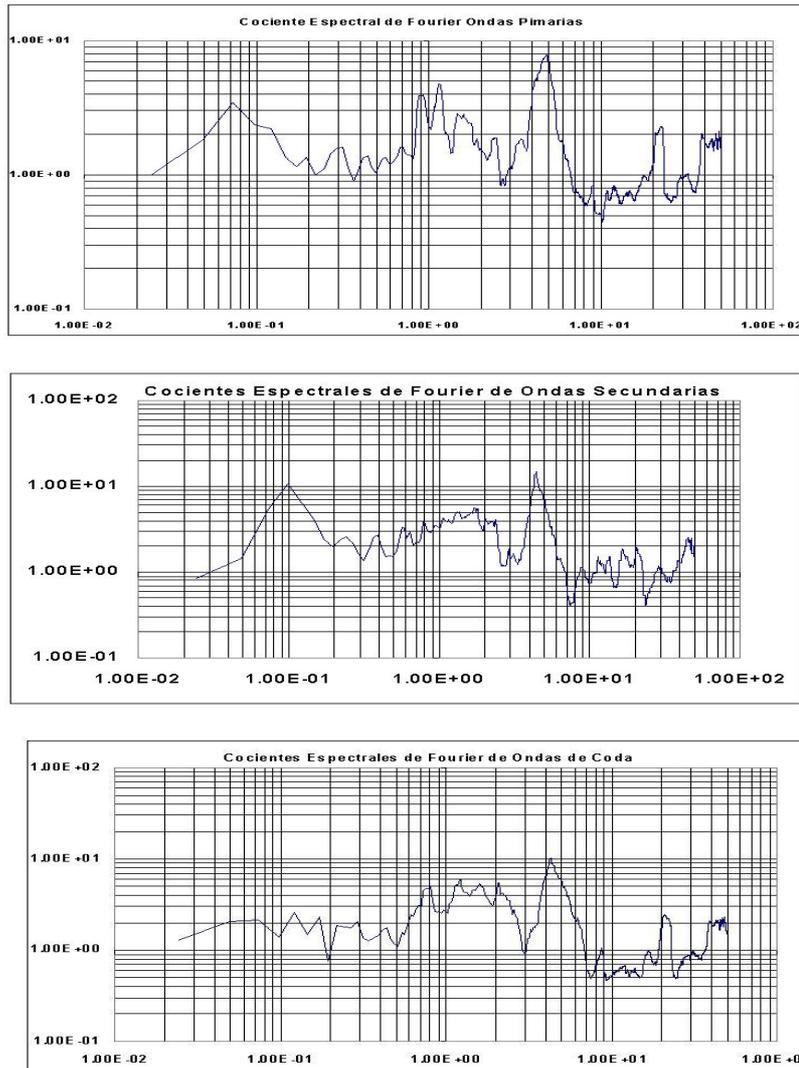


Figura 8. Cocientes espectrales para la estación en suelo blando. En la parte superior el cociente H/V para la parte de preevento, en seguida para las ondas primarias, después para las ondas secundarias y en la parte inferior para las ondas de coda. El eje horizontal se gráfica en logaritmo de la frecuencia en Hz y en el vertical se gráfica el logaritmo de la amplitud (adimensional)

Los cocientes de roca no muestran un pico predominante y aunque el espectro tiende en promedio a comportarse como plano, existen oscilaciones que afectan al hacer la relación SV_S / SV_R . Es por ello que los cocientes espectrales H/V de la estación en suelo blando no coinciden en todos los picos. Aun así tanto en H/V como en SV_S / SV_R persiste la coincidencia de los dos picos.

En la tabla 2 se muestran algunos ejemplos de las lecturas que se obtuvieron a partir de los cocientes espectrales H/V de microtemores haciendo referencia a las FT y a los cocientes espectrales en suelo blando de los eventos sísmicos.

Tabla 2. Muestra los valores en periodos , leídos en las gráficas de Cocientes Espectrales (H/V) de los microtemores en el vértice A de los arreglos.

VERTICES DEL PUNTO (A)	Coordenadas en GMT		Frecuencias	Periodos
puntos	X	Y	Hz	Segundos
1	809976	2150680	11.45	0.09
2	809524	2151341	9.00	0.11
3	806996	2151516	2.55	0.39
4	808560	2149979	9.27	0.11
5	809897	2149261	7.60	0.13
6	811197	2149814	7.56	0.13
7	812100	2149778	6.78	0.15
8	814218.963	2150468.57	17.30	0.06
9	813321	2149011	7.10	0.14
10	813046	2148341	9.00	0.11
11	811539.526	2147545.1	8.50	0.12
12	812932	2146703	3.90	0.26
13	810537	2145966	1.60	0.63
14	808668	2144743	4.00	0.25
15	807305.24	2146878.98	2.70	0.37
16	810109	2146780	3.00	0.33
17	807309	2149300	4.90	0.20
18	812050	2151236	3.70	0.27

Con los valores obtenidos de los cocientes espectrales de microtemores de los tres vértices de los 18 triángulos se obtuvo el mapa de isoperiodos de la ciudad de Uruapan Michoacán.

Después del sismo de Colima del 19 de enero del 2000, se colocó un sensor Guralp de banda ancha, que se ubicó cerca de los arreglos triangulares 16 del vértice A y 5 vértice C, de dichos arreglos, grabándose así varios registros de eventos sísmicos. Esto permitió obtener mas datos, y poder dar mas sustento a nuestro trabajo, actualizando el mapa de isoperiodos de la ciudad de Uruapan con la información reciente. Este mapa actualizado se muestra en la fig. 4.

MAPA DE ISOPERIODOS DE LA CIUDAD DE URUAPAN

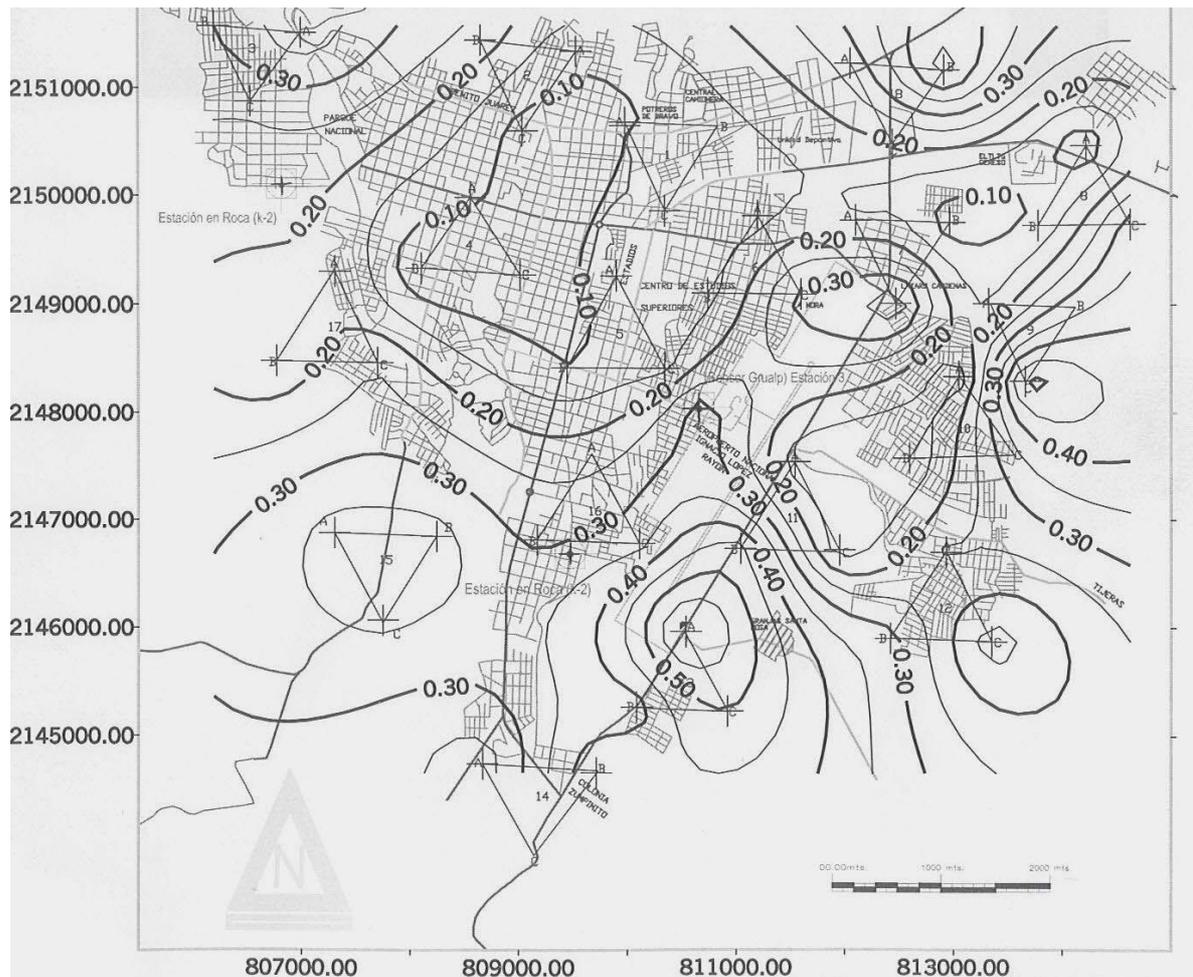


Figura 4. Mapa de isoperiodos de la ciudad de Uruapan Los contornos están dados en segundos, y las acotaciones de los ejes vérticales y horizontales están en metros.

CONCLUSIONES

Basados en los valores obtenidos de los cocientes espectrales H/V, y en las funciones de transferencia de Fourier de los eventos registrados en las estaciones semi-permanentes, y con los resultados de los cocientes H/V de microtremores de los 18 arreglos, se estimó el mapa de isoperiodos con periodos máximos de $T = 0.6$ segundos y mínimos de $T = 0.10$ segundos.

Los resultados obtenidos a partir de las observaciones de microtremores han sido correlacionados con datos de estudios geotécnicos así como con datos de registros de un evento sísmico dándole con ello mayor sustento y robustez a los resultados.

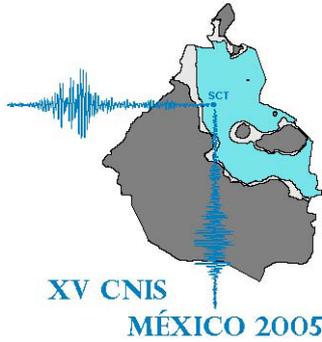
Los periodos mas altos se localizaron hacia el este y sur de la ciudad eso indica que el espesor de los sedimentos se va incrementando en esta dirección. El crecimiento urbano de la ciudad también se desarrolla hacia esa parte.

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos la colaboración de Ernesto Briones, Edgar Mares, Víctor Hernández, Oscar Ochoa y Ulises Rosiles en los trabajos de campo. El desarrollo de este trabajo ha sido posible gracias al apoyo económico al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT (Proyecto 37334-T). Una parte de este proyecto a sido financiado por el Instituto de Ingeniería, UNAM (FI³, proyecto 2518).

REFERENCIAS

- Flores Estrella H., (2001), "Métodos alternos para la estimación de efectos de sitio mediante el uso de arreglos de microtremores". *Tesis de licenciatura* ., *Facultad de Ingeniería. UNAM México*, Marzo 2001.
- García Acosta V. y Suárez Reynoso G., (1996), Los sismos en la historia de México, primera edición, tomo1, Ediciones Científicas Universitarias, coedición UNAM y el Fondo de cultura económica.
- Garduño M. V. H., Arreigue R.E., Chiesa S., Israde Alcantar I., Rodríguez T,G,M. Y Ayala G. M., (1998), "Las Fallas geológicas y sísmicas de la ciudad de Morelia y su influencia en la amplificación del territorio". *Ingeniería civil*, Vol. 1, No5. p. 3-12.
- Información proporcionada en las oficinas de INEGI en la ciudad de Morelia Michoacán, (2001).
- Iris. Servicios de consulta en línea, (2001), <http://www.iris.Washington.edu>.
- Jara J. M. y Sánchez A. R., (2001). "Estimación de Riesgo Sísmico de Morelia". *Revista de la coordinación científica de UMNSH*. No. 29.
- Kulhánek, O., (1976), "Introduction to digital filtering in Geophysics." *Elsevier Scientific Publishing Company*, The Netherlands, 168 pp.
- Nakamura, Y., (1989), "A method for dynamic characteristics estimation of surface using microtremor on the ground surface. *QR of R..T. r.*, 30-1.
- Singh S. K., Rodriguez M., and Esteva L.,(1983), "Statistics of Small Earthquakes and frequency of Occurrence of large Earthquakes Along the Mexican Subduction Zone". *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73 No.6, pp 1779-1796.



Artículo IV-05

ESTUDIO DE MICROTREMOS PARA LA CIUDAD DE URUAPAN MICHOACAN APLICANDO EL METODO SPAC

Ricardo Vázquez Rosas ⁽¹⁾, Jorge Aguirre González ⁽¹⁾, Horacio Mijares A. ⁽¹⁾, Víctor H. Garduño Monroy y Eleazar Arreygue Rocha ⁽²⁾

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 microtremores 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 microtremores 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 en la ciudad de Uruapan.

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 in Uruapan city.

INTRODUCCION

La ciudad de Uruapan Michoacán se localiza al oeste del estado de Michoacán (19 °25 ' 00"; 102 ° 04 '00") a una altura de 1,600 metros sobre el nivel del mar. Su superficie es de 830.28 kilómetros cuadrados y representa el 1.39 por ciento del total del estado. Es una de las mas importantes dentro de nuestro estado ya que ha tenido un gran desarrollo en cuanto a población y vivienda.

(1) Coordinación de Ingeniería Sismológica, Instituto de Ingeniería, UNAM. Ciudad Universitaria. Apdo. postal 70-472, Coyoacán, 04510 México DF. RvazquezR@iingen.unam.mx, joaqq@pumas.iingen.unam.mx

(2) Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, UMSNH. Ciudad Universitaria, edificio U, Morelia Michoacán. vgmonroy@zeus.unimich.mx, arocha@zeus.unimich.mx

El Estado de Michoacán forma parte de una de las zonas con mas alta sismicidad de nuestro país, donde se han generado sismos históricos de más de 8.0 grados de magnitud (Jara y Sánchez, 2001) por lo que se realizó una recopilación histórica desde 1882 y 1943.

En el estado, se tienen tres fuentes potenciales de generación de sismos:

Los generados por la actividad Volcánica (como los sismos que se produjeron en las erupciones de los volcanes Jorullo en 1759 y Paricutín en 1943).

Los generados por la Tectónica.

- Subducción: sismos producidos por al Placa de Cocos, estos sismos ocurren a profundidades de entre 10 y 30 Km. aproximadamente como ejemplo podemos mencionar los sismos de, 1979 (M 7.4) y 1985 (8.1).

- Intraplaca (rompimiento de litósfera oceánica subducida) : son producto de la subducción pero con epicentro dentro de la placa oceánica bajo el continente. Son sismos poco frecuentes y a mayores profundidades (alrededor de 60 Km.) donde la placa comienza a fundirse, pero que pueden causar grandes daños.

- Fallas Locales (intraplaca dentro de la placa continental). Puesto que los sismos producto de las fallas locales son focos superficiales, esto provoca que la energía liberada, producto de un evento de este tipo incida casi directamente (por ejemplo Falla de Acambay 1912, M=7.0)

Y eventualmente los artificiales (por ejemplo construcción de presas).

Por lo cual es importante tener conocimiento de como se va ha comportar el suelo ante un evento sísmico, ya que en la actualidad no se conocen los parámetros de seguridad de riesgo sísmico de cada ciudad, por lo que, los reglamentos de construcción se basan en el establecido para la ciudad de México.

CONTEXTO GEODINAMICO Y GEOLOGIA REGIONAL DE URUAPAN MICHOACAN.

La ciudad se desarrolla en una Zona de acumulación que forma parte de la cuenca del río Cupatitzio. Esta depresión genera que depósitos provenientes de los volcanes monogenéticos rellenen a esta depresión, donde de está manera se reconocen de la base a la cima de esta ciudad, (ver fig.1). La ciudad de Uruapan se localiza en un límite sur del Cinturón Volcánico Mexicano, en una depresión que fue ocupada por el vulcanismo monogenético del corredor tarasco, este esta descansando sobre rocas graníticas que afloran a pocos kilómetros al sur de la ciudad. (ver fig. 1).

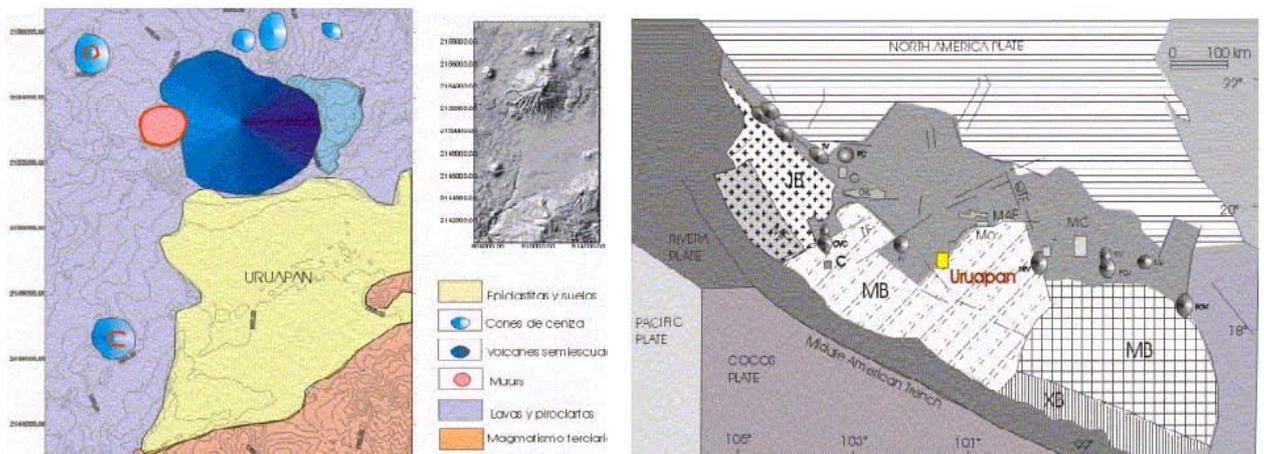


Figura 1. Geología de la ciudad de Uruapan (izquierda) y ambiente tectónico regional .

En Michoacán el fenómeno de los terremotos es una realidad que desde hace siglos ha causado daños en varias poblaciones del estado. Su ubicación geográfica es la principal causa de estos acontecimientos, ya que por un lado, Michoacán se encuentra en el límite de dos placas tectónicas (Pacífica y Norteamericana), además de estar ligado al movimiento de subducción de otra micro placa (Cocos).

Por su parte, Garduño (1999) afirma que los arcos volcánicos del Mesozoico (terreno Guerreo) y la Tectónica edificaron a la Sierra Madre del Sur, ésta es una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias donde se desarrollaron algunas incipientes plataformas calcáreas o en otros casos secuencias distales de rocas terrígenas tipo turbiditas. Estas secuencias han sido deformadas por dos fases plicativas durante el Cretácico superior, por una tectónica de fallas transcurrentes del Mioceno y por una tectónica primero transtensiva y después distensiva, que afecta al Cinturón Volcánico Transmexicano.

El estado de Michoacán a través de la historia, ha sido testigo de infinidad de movimientos telúricos, como el del 19 de Junio de 1858 ($M_g = 7.0$), o el del 19 de Septiembre de 1985 ($M_g = 8.1$), que desgraciadamente, derivaron en pérdidas humanas y materiales. El estado Michoacán como podemos observar en el mapa (Fig. 2) de isosistas acumulado (Carlos Gutiérrez CENAPRET) a partir de 1945-1985 se observa que el estado esta dentro de las zonas mas afectadas por sismos.

REVISIÓN HISTÓRICA DE LA SISMICIDAD DE URUAPAN (1858 – 1943)

En este párrafo se describen algunos datos históricos de eventos sísmicos que se han sentido en la ciudad de Uruapan (García y Suárez ,1996).

- 19 de junio de 1858, Uruapan, Terremoto espantoso, 9:05 am. Donde el sacudimiento causó fuertes daños de templos y casas y varias desgracias personales.
- 19 de Julio de 1882. Uruapan, Temblor de Trepidación. De (...) 1 a 2:25 pm.

Mapa de intensidades de la sismicidad la república Mexicana representando el acumulado para Zamora Michoacán a partir de 1945-1985 (CENAPRED).

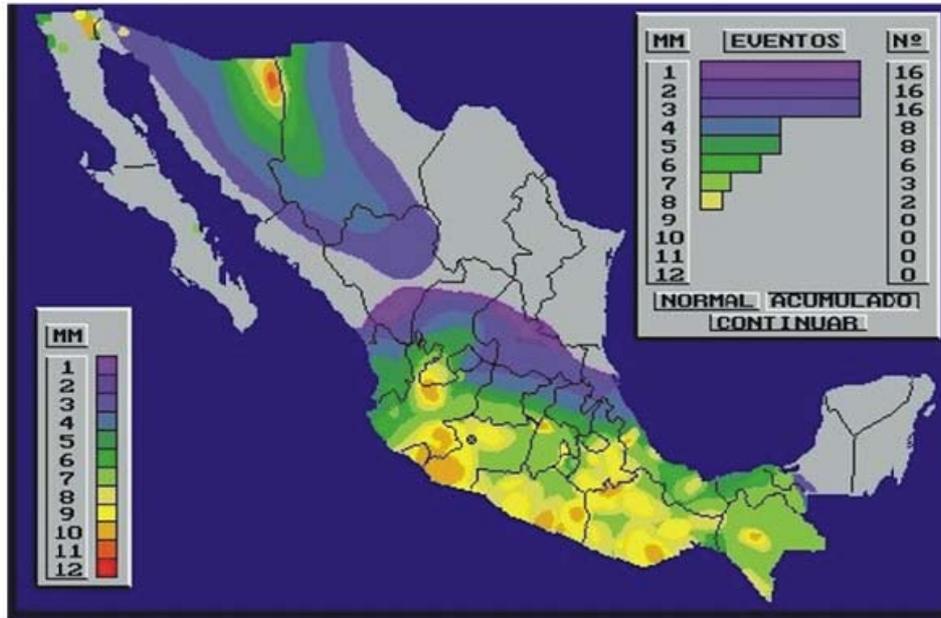


Figura2. Mapa de isosistas acumulado de 1945-1985(CENAPRET)

- 9 de Febrero de 1886. Uruapan, Temblor de Oscilación de Sur a Norte. De 3:30 am, fuerte sacudimiento, por espacio de 2 segundos. Después se repitió media hora.
- 12 de Noviembre de 1891. Uruapan, Fuerte Temblor Oscilatorio de SE a NE. de 10:11 am. Con duración de 3 segundos.
- 16 de Marzo de 1895. Uruapan, 2 Temblores uno de Trepidación y otro Oscilatorio con intervalos de segundos.
- 5 de Abril de 1895, (...) Fuerte temblor oscilatorio S a N. entre 2:30 y 3.00 am. con duración de 3 y 4 segundos que repitió como a los 5 segundos.
- 18 de Enero de 1906, Uruapan, Temblor Trepidatorio, de 12:15 pm. con una duración de 5 segundos y prolongados ruidos subterráneos.
- 20 de Agosto 1906, Uruapan, Temblor Oscilatorio y Trepidatorio dirección NO a SE, a las 11:54 pm. con duración de 25 segundos.
- 14 de Abril de 1907, Uruapan, Temblor Oscilatorio de NS, a las 00:35 am.
- 12 de Mayo de 1910, Uruapan, Temblor Oscilatorio NO-SE duración de 55 segundos.
- 7 de Junio de 1911, Uruapan, Temblor Oscilatorio NS con una duración de 2 minutos y M=4 causó varios desperfectos en algunos edificios.
- 31 de Enero de 1912, Uruapan Temblor Oscilatorio, con una duración de 8 segundos.
- 14 de Febrero de 1943, sentidos ligeros en Uruapan (...).

- 23 de Marzo de 1943 , Uruapan Temblor Oscilatorio sentido fuerte.

ANTECEDENTES LOCALES DE URUAPAN MICHOACÁN

Localización: Se localiza al Oeste del estado a una altura de 1,600 m sobre el nivel del mar. Su superficie es de 830.28 Km² y representa el 1.39% de total del estado.

Su Población y Vivienda.

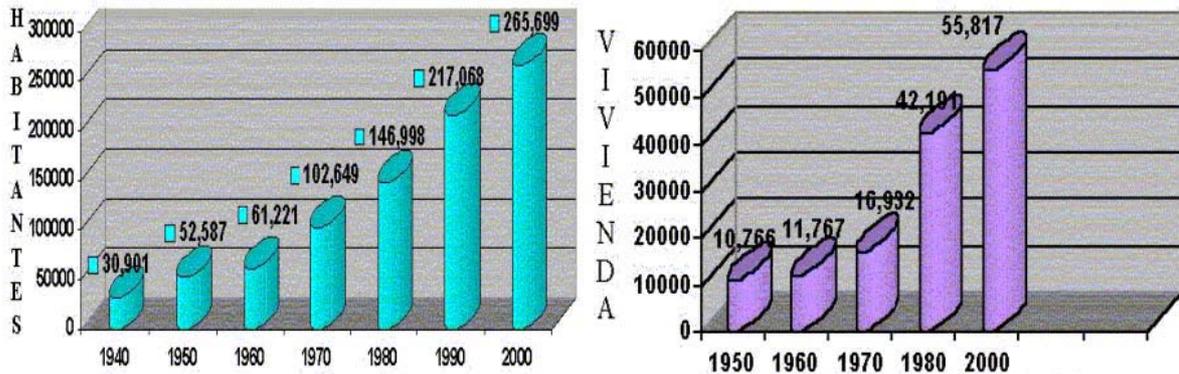


Figura 3. Crecimiento de población y crecimiento de vivienda (INEGI,2001).

La ciudad de Uruapan es una de las ciudades mas importantes del estado de Michoacán, ya que ha tenido un gran crecimiento en cuanto a población y vivienda. Como podemos observar en la fig. 3 es muy clara la diferencia de población entre 1980 y 2000 que es de 119000 habitantes y equivale a un crecimiento poblacional del 80.95 % en 20 años. Mientras que en vivienda se tiene registrada del año 1970 al 2000, una diferencia de 38,885 viviendas que representaría el 229.65 % de crecimiento de vivienda en 30 años.

MÉTODO 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 $u(r,\theta,\omega,t)$, las cuales son observadas en el centro C del arreglo y en el punto sobre el círculo de radio r . Entonces la función de autocorrelación espacial se define como:

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

(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:

$$, (2) \phi(0, \omega)$$

Donde ϕ es la función SPAC en el centro . La integral de la ecuación (2) se reduce a:

$$) = J_0 \left(\frac{\omega r}{c(\omega)} \right)$$

$$, (3) J_0(\cdot)$$

Donde J_0 es la función de Bessel de primer especie y de orden cero, c es la velocidad de fase en la frecuencia . 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: \int_0^2

$$, (4) \text{Re}[\cdot]$$

Donde $\text{Re}[\cdot]$ significa la parte real de un valor complejo, S_C y S_X son los espectros de potencia de los microtemores en los dos sitios C y X respectivamente, S_{CX} 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 .

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).

APLICACIÓN DEL MÉTODO DEL METODO SPAC.

La ciudad de Uruapan se realizaron mediciones de microtemores usando sensores Guralp de tres canales de banda ancha. De acuerdo a las dimensiones de la ciudad se propusieron 18 arreglos en forma de triángulos equiláteros, de una distancia de 1km. Entre cada uno de sus vértices procurando cubrir toda la ciudad, y al mismo tiempo tener el mayor número de registros posible.

Se instalaron también dos acelerómetros K2 que se ubicaron: en dos tipos de suelo, uno en roca y otro en suelo blando. Estos acelerómetros se quedaron instalados durante un mes, dentro del cual se logro registrar un evento sísmico que fue de gran apoyo para este trabajo de investigación.(Fig. 5)



Figura5. Sensor reftek- das k2

Anteriormente con los datos del presente trabajo se realizó un estudio de microtemores usando el método de Nakamura obteniendo así el periodo fundamental, en los que se determinaron periodos máximos de alrededor de $T = 0.6$ seg. y mínimos de $T = 0.10$ seg. Con estos valores de periodos se elaboró la propuesta de Microzonificación sísmica de la ciudad de Uruapan Michoacán (Fig. 6) con el fin de que este mapa pueda servir de base para estudios de riesgo sísmico así como apoyo para la elaboración o actualización del reglamento de

construcción, y obteniendo así el mapa de microzonificación sísmica de la ciudad de Uruapan.

MAPA DE ISOPERIODOS DE LA CIUDAD DE URUAPAN

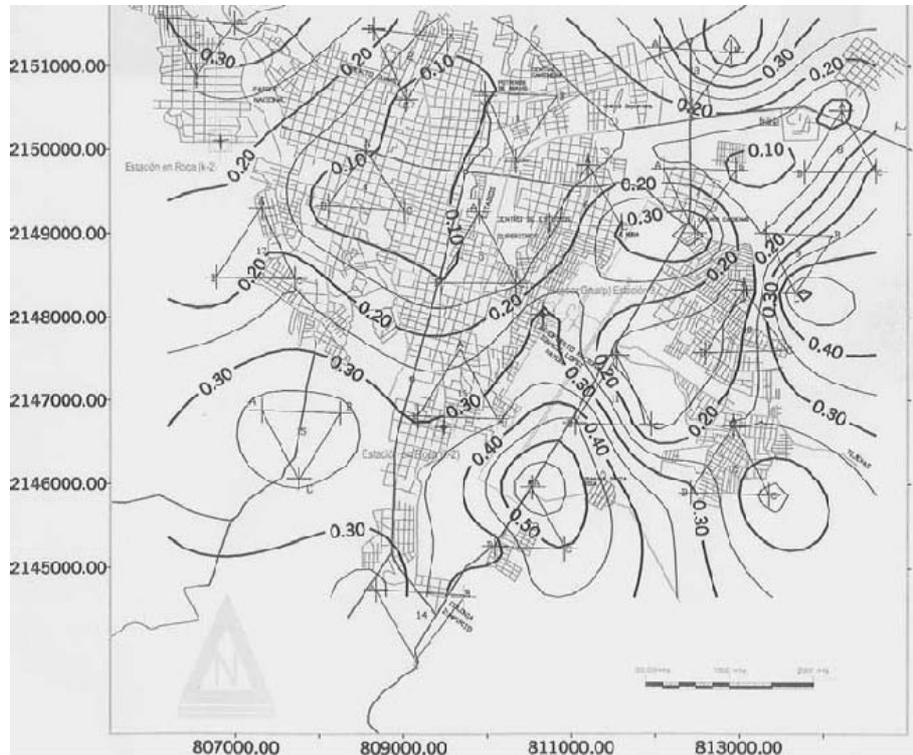


Figura 6. Mapa de isoperiodos de la ciudad de Uruapan. Los contornos están dados en segundos, y las acotaciones de los ejes verticales y horizontales están en metros.

Ahora para el presente trabajo aplicaremos el método SPAC a los datos de microtremores. Primero calculando la curva de dispersión de ondas Rayleigh y, a partir de ella, estimar un modelo de velocidades para cada arreglo. Después con la información de todos los arreglos, llegar a obtener un modelo tridimensional.

Pre-Procesado:

Se truncaron los registros para tener el mismo tiempo de referencia en todas las estaciones ya que lo que se pretende es obtener 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 con un programa en Fortran.

Se leen los archivos truncados con un encabezado.

Se leen ventanas de tiempo seleccionadas de (81.92 segundos).

Se obtienen los espectros de potencia para cada ventana y cada estación.

Se calculan los coeficientes de correlación.

Aplicación del método SPAC en 18 arreglos realizados en toda la ciudad con registros

de 1800 segundos de grabación con arreglos instrumentales de 950m cada uno, Como se muestra a continuación. En siguiente figura se muestra un registro de 1800 seg. De uno de los 18 arreglos.

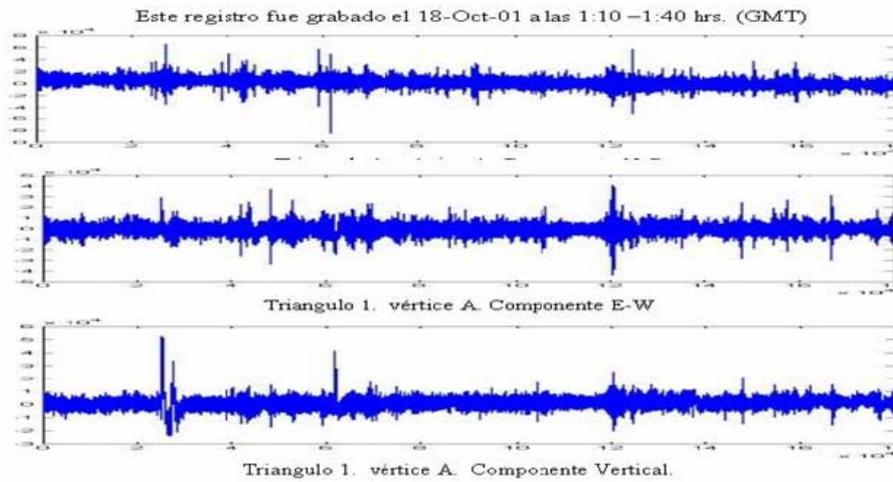


Figura7. Arreglo 1 dirección NS ventana de 30 minutos. Las unidades en el eje horizontal están en segundos y en el eje vertical están en cuentas.

Una vez truncadas las señales se seleccionaron 21 ventanas de 81.92 segundos para después procesarlas, y se obtiene la correlación de unidades, el suavizado, obtenemos los espectros de potencia para cada uno de los vértices (Figuras 8,9 y 10).

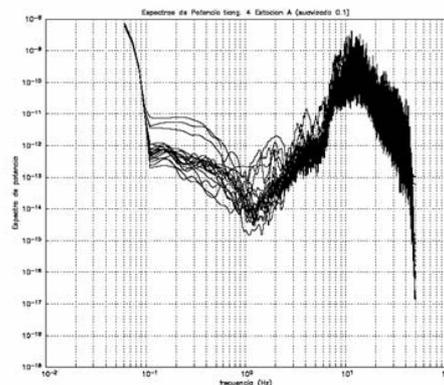


Figura 8. Espectro de potencia para el arreglo 4 mostrando para las 21 ventanas (vértice A).

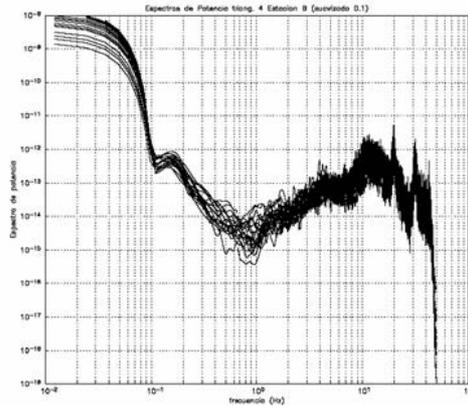


Figura 9. Espectro de potencia para el arreglo 4 mostrando para las 21 ventanas (vértice A).

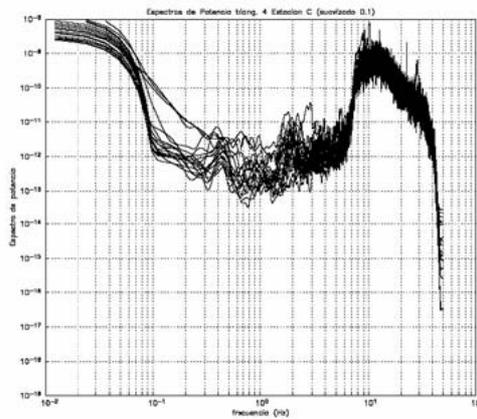


Figura 10. Espectro de potencia para el arreglo 4 mostrando para las 21 ventanas (vértice A).

Para cada una de las 21 ventanas se obtienen los coeficientes de correlación. Para el ejemplo que hemos tomado del arreglo 4 (de 950 metros de abertura) las correlaciones son mostradas en las Figura 11. En cada cuadro aparecen las cross-correlaciones normalizadas para las tres vértices (lo que corresponde a la parte que se encuentra dentro de la integral de la ecuación 4) donde estas correlaciones se obtuvieron para cada uno de los arreglos y seleccionando todas aquellas que tuvieran el mismo cruce por cero en la misma frecuencias y que tuvieran la misma similitud entre ellas donde una vez Seleccionadas se vuelven a calcular los espectros para las ventanas seleccionadas y las correlaciones.

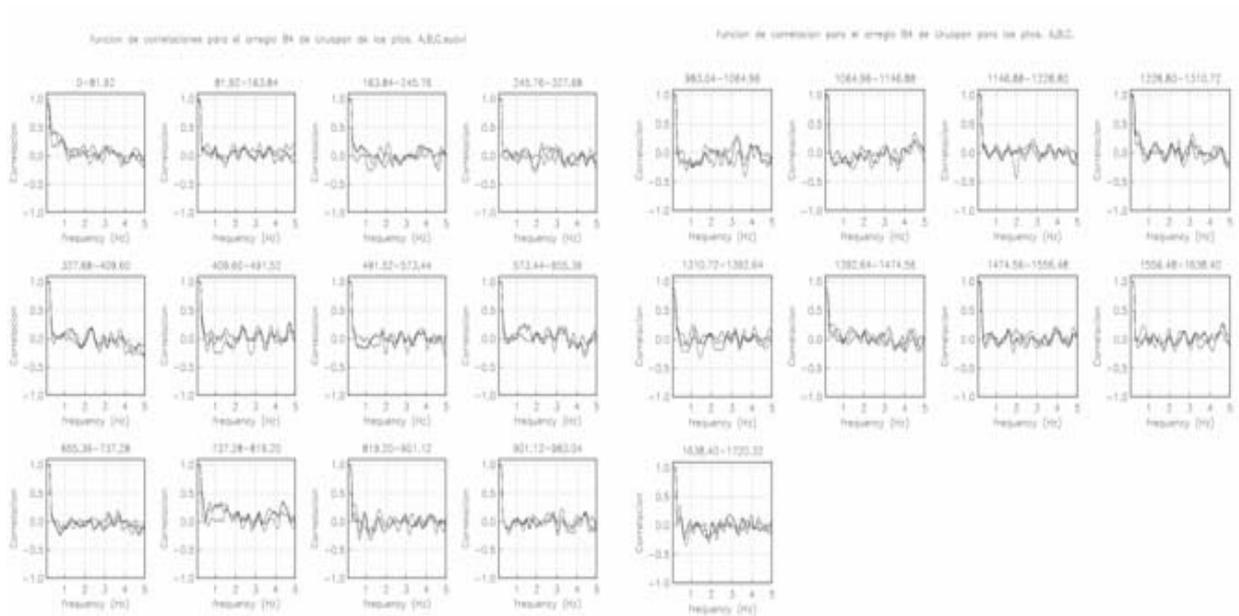


Figura11. Ejemplo de correlaciones calculadas entre las tres estaciones para las primeras doce ventanas de 81.92 segundos.

Después de calcular las funciones de correlación se seleccionaron todos aquellos que mas se parecieran a una función Bessel de orden cero, y cuidando también los cruces por ceros, que estos cruces estuvieran en el mismo rango de frecuencias y seleccionando todas aquellas que mejor tuvieran similitud entre ellas. Una vez realizado esto se procede a calcular el coeficiente de correlación para cada arreglo considerando los tres vértices, del cual para el presente trabajo se muestra para el arreglo 4 con 8 ventanas seleccionadas. Fig. 12

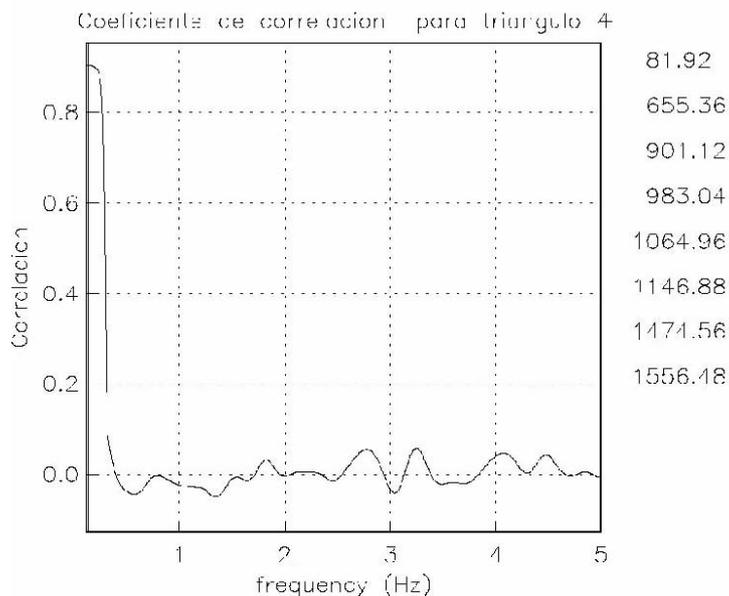


Figura 12. Ejemplo del coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo 4.

Una vez seleccionados las mejores correlaciones se calcula la curva de dispersión para cada uno de los vértices como se muestra en la Figura 13, en esta figura solo se grafican las secciones de curvas comprendidas entre líneas rectas que delimitan el abanico de confiabilidad

según lo definió Miyacoshi (1995).

En la misma grafica aparece la curva de dispersión calculada con la estratigrafía mostrada en la tabla de la parte superior derecha de la misma figura. El modelo estratigráfico fue obtenido por ensayo y error, a partir del modelo inicial propuesto.

DISCUSIÓN Y RESULTADOS.

Todo este procedimiento se realizó para cada uno de los arreglos instrumentales realizados en la ciudad de Uruapan Michoacán. Sin embargo por razones prácticas, a continuación únicamente se muestran los resultados tabla 1.

En los arreglos realizados en la ciudad de Uruapan Michoacán solo se pudo obtener la curva de dispersión para 5 sitios (Fig. 14) de la zona de estudio, debido a que la mayoría de los arreglos no tenía buena correlación entre las señales de los tres vértices. De los cinco arreglos estudiados la estructura de velocidades fue aproximada usando un modelo de una capa muy gruesa debido al rango de frecuencias que este tamaño de arreglo nos permitió analizar. Las condiciones físicas de los sitios, como es la presencia de los ríos y la topografía del lugar, es un factor muy importante que puede explicar la falta de correlación entre señales situadas en condiciones físicas distintas. En términos generales hay una coincidencia con el cause de los ríos que atraviesa la ciudad y los arreglos que no tuvieron buena correlación.

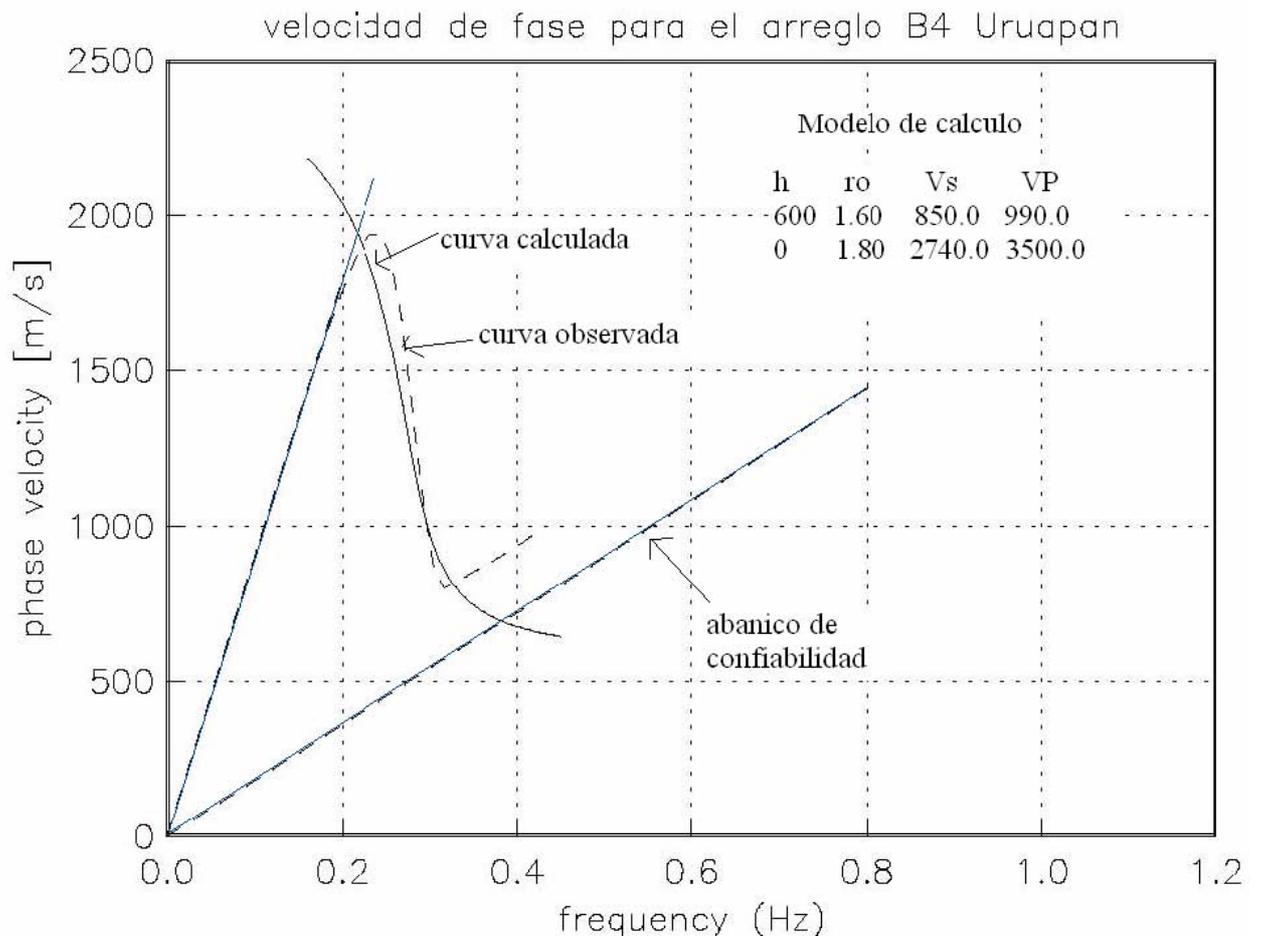


Figura 13. Curva de dispersión observada para los tres vértices ABC (línea punteada) y la curva calculada (línea continua) y su abanico de confiabilidad. En el recuadro aparece el modelo de velocidades de la curva calculada.

Como es puede ver en al figura 14 de acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que hacia la parte sur de la ciudad no se pudo obtener correlaciones con aberturas en los arreglos de 950 m. Para obtener resultados más precisos se deberán realizar mediciones pero con arreglos más pequeños. Es decir hacer mediciones en varios triángulos de menores aberturas en la zona sur de la ciudad de Uruapan.

Tabla 1. Resultados de las curvas dispersión calculadas para la ciudad de Uruapan Michoacán

Arreglo	Espesor y semi- espacio	ro	Vs	Vp
1	445	1.60	1590.0	1770.0

	0	1.80	2310.0	2950.0
2	245	1.60	1780.0	1950.0
	0	1.80	1440.0	2800.0
8	560	1.60	890.0	1300.0
	0	1.80	3000.0	3900.0
14	690	1.60	1280.0	1400.0
	0	1.80	2900.0	4800.0

Mapa de los arreglos calculados con el método SPAC para la Ciudad de Uruapan Michoacán

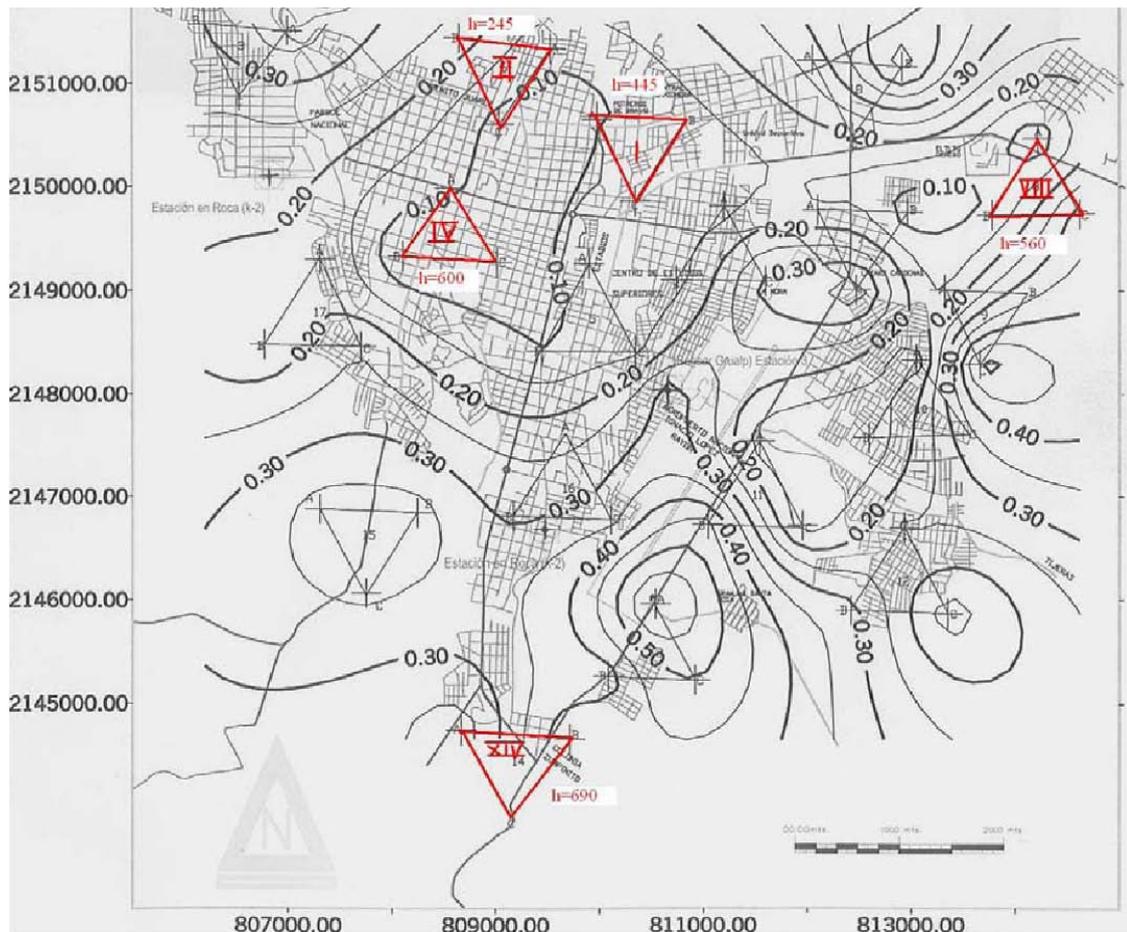


Figura 14. muestra el mapa de isoperiodos calculado y muestra los arreglos los cuales se pudo estimar la estructura de velocidades, los contornos estan dados en segundos y las acotaciones del plano están en UTM

CONCLUSIONES.

Se analizaron 18 arreglos instrumentales en la ciudad de Uruapan. En cada arreglo se contó con registros de 30 minutos consecutivos grabados simultáneamente en tres estaciones localizadas en los vértices de los triángulos equiláteros y separadas 950m. una de otra. Se utilizaron sensores Guralp de banda ancha (30 segundos) conectados a Reftek.

Los cinco sitios que presentaron buenas correlaciones fueron modelados utilizando modelos de una sola capa de velocidades superiores a los 850 m/s para las ondas S. es necesario correlacionar estos resultados con otras fuentes de información como pueden ser la información de pozos.

Una de las posibles explicaciones de la falta de correlacion en las estaciones restantes es la presencia del cause de rios. Por ello se propone, para mejorar los presentes resultados, realizar arreglos de menor abertura.

REFERENCIAS

- Aki, K., 1957. Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 35, 415-456.
- 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.
- Flores Estrella H., (2001), "Métodos alternos para la estimación de efectos de sitio mediante el uso de arreglos de microtremores". *Tesis de licenciatura* ., *Facultad de Ingeniería. UNAM México*, Marzo 2001.
- García Acosta V. y G. Suárez Reinoso (1996), Los sismos en la historia de México, primera edición, tomo1, Ediciones Científicas Universitarias, coedición UNAM y el Fondo de cultura económica.
- Garduño M. V. H., R. E. Arreigue, S. Chiesa, I. Israde Alcantar, T. G. M. Rodríguez y G. M. Ayala (1998), "Las Fallas geológicas y sísmicas de la ciudad de Morelia y su influencia en la amplificación del territorio". *Ingeniería civil*, Vol. 1, No5. p. 3-12.
- Información proporcionada en las oficinas de INEGI en la ciudad de Morelia Michoacán, (2001).
- Iris. Servicios de consulta en línea, (2001), <http://www.iris.Washington.edu>.
- Jara J. M. y A. R. Sánchez (2001). "Estimación de Riesgo Sísmico de Morelia". *Revista de la coordinación científica de UMNSH*. No. 29.
- Kulhánek, O., (1976), "Introduction to digital filtering in Geophysics." *Elsevier Scientific Publishing Company*, The Netherlands, 168 pp.
- Miyakoshi , 1995. Tesis Doctoral (en japonés), Universidad de Hokaido.
- Nakamura, Y., (1989), "A method for dynamic characteristics estimation of surface using microtremor on the ground surface. *QR of R..T. r.*, 30-1.
- Singh S. K., M Rodriguez and L. Esteva L.,(1983), "Statistics of Small Earthquakes and frequency of Occurrence of large Earthquakes Along the Mexican Subduction Zone". *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73 No.6, pp 1779-1796.
- Vazquez Rosas R,(2002), "Propuesta de microzonificación sísmica para la ciudad de Uruapan Michoacán". *Tesis de licenciatura* ., *Facultad de Ingeniería UMSNH Morelia Mich.* Noviembre 2002.

Estudio de vibración ambiental en arreglos instrumentales en la ciudad de Monterrey, Nuevo León.

Ricardo Vázquez Rosas, Jorge Aguirre González, Juan C. Montalvo A. y Horacio Mijares A.

Objetivos:

El objetivo de este proyecto es colaborar con el Dr. Juan Carlos Montalvo Arrieta de la Facultad de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Nuevo León para medir la vibración ambiental en varios sitios de la ciudad de Monterrey. Con esta información se pretende contribuir al estudio de los efectos de sitio mediante la determinación de los periodos dominantes y la inversión de estructuras de velocidad aplicando el método H/V (de Nakamura) y SPAC, respectivamente.

Resumen

Una de las partes fundamentales en todo estudio de riesgo sísmico es la evaluación del efecto de sitio. Para éste fin, y como primer acercamiento, se realizan mediciones de vibración ambiental (microtremores) en estaciones aisladas. Con estos registros es posible obtener periodos dominantes de ese sitio usando el método H/V (de Nakamura), cuando existen fuertes contrastes de impedancia. Aunque el periodo dominante es una información importante no nos proporciona mayor información sobre la estratigrafía. En contraste, el método SPAC (Spatial Auto-correlation Method) a través de la curva de dispersión de ondas Rayleigh, permite estimar la estructura de velocidades. El método SPAC requiere de arreglos instrumentales en donde los microtremores son observados simultáneamente en varias estaciones (típicamente 4). Por lo cual, se propone realizar arreglos instrumentales distribuidos en toda la ciudad de Monterrey con una densidad uniforme, lo que permitirá usar los datos para los dos fines planteados. Los instrumentos que se usaran serán sensores Guralp de 30 segundos conectados a un sistema de adquisición DAS de Reftek

II. Descripción de los arreglos

En cuatro localidades de la Ciudad de Monterrey se desplegaron arreglos consistenetes ede tres estaciones localizadas en los vertices de triangulos equilateros con diferentes aberturas. Las mediciones se realizaron en forma simultanea. Las aberturas variaron de acuerdo a las condiciones de cada punto de observación siendo el arreglo mas grande de 280 metros en la localidad que llamamos Centro. A continuación realizamos la descripción de cada una de las localidades en donde se realizaron los arreglos.

II.1 Arreglos Estadio UANL (EST).

Este sitio se ubicó en el estacionamiento del estadio de fútbol de la Universidad Autónoma de Nuevo León y colinda con la avenida Universidad. Las coordenadas del punto central son: latitud norte 25 grados, 43 minutos y 11.9 segundos, Longitud oeste 100 grados, 18 minutos y 54.3 segundos. En este sitio se realizaron cuatro arreglos con

aberturas de 7.5, 15, 50 y 150 metros. Por ser este el sitio donde se iniciaron las mediciones, previo a los arreglos se realizó una prueba de calibración. La prueba consistió en observar microtemores por un lapso de tiempo de 20 minutos con todos los sensores juntos. En la siguiente tabla 1 se muestran los tiempos de medición según cada arreglo.

Arreglo	Inicio (en GMT)	Termino (en GMT)
Calibración	21:20	21:40
7.5 m	22:20	22:50
15 m	23:10	23:40
50 m	23:50	00:20
150 m	01:00	01:30

Tabla 1. Muestra los tiempos de inicio y termino de cada arreglo realizados en el sitio denominado EST en tiempo GMT.

En la figura 1 se muestra gráficamente la localización de los arreglos y la posición relativa de cada estación.

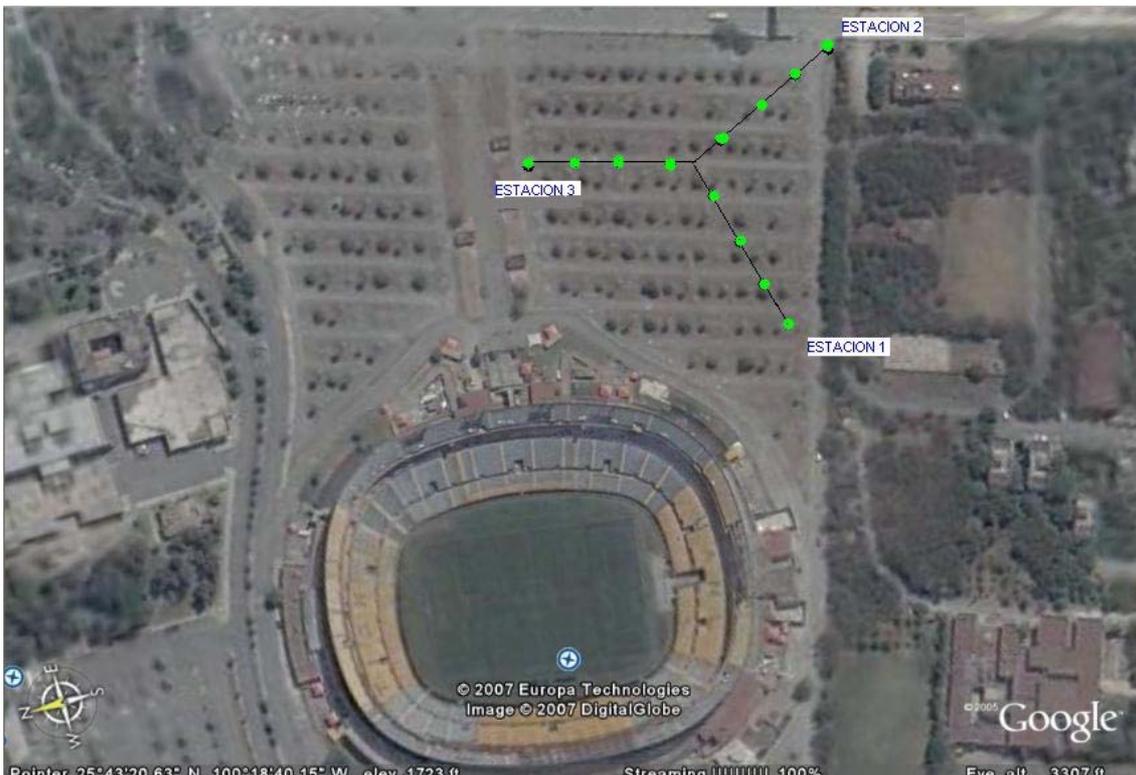


Figura 1. Esquema de los arreglos realizados en el estacionamiento del estadio de fútbol de la Universidad Autónoma de Nuevo León (google earth).

II.2 Arreglos Roma (RM).

Estos arreglos se realizaron en un parque de la colonia Roma y calles aledañas. Las coordenadas del centro de los arreglos son: latitud norte 25 grados, 39 minutos y 9.8 segundos, longitud oeste 100 grados, 17 minutos y 45.8 segundos. En esta localidad

realizamos arreglos a 27, 50 y 150 metros de abertura con respecto al centro. En la tabla 2 se indican los tiempos en que se realizaron las lecturas y en la figura 2 se muestra la posición del arreglo en forma esquemática.

Arreglo	Inicio (tiempo GMT)	Termino (tiempo GPS)
27 m	20:20	20:50
50 m	19:40	20:10
150 m	18:50	19:20

Tabla 2. Muestra los tiempos de inicio y termino de cada arreglo realizados en el sitio denominado RM en tiempo GMT.



Figura 2. Esquema de los arreglos realizados en un parque ubicado en la colonia Roma (google earth).

II.3 Arreglo Lecho del Río santa Catarina (RSC).

Estos arreglos se localizaron en el borde oriente del lecho del río Santa Catarina. Este lugar se usa para practicar el softball. De hecho, uno de los arreglos tuvo que ser interrumpido por el inicio de un partido. Ese arreglo fue repetido y aquí solo se considera cuando se pudo completar la medición continua de 30 minutos. Debido a las dimensiones del terreno se realizaron únicamente 3 tamaños de arreglos de 7.5, 15 y 50 metros. Las coordenadas del centro del arreglo son: latitud norte 25 grados, 39 minutos y 51.6 segundos, longitud oeste 100 grados, 19 minutos y 17.5 segundos. En la tabla 3 se indican los tiempos en que se realizaron las lecturas y en la figura 3 se muestra la ubicación de las estaciones en cada arreglo.

Arreglo	Inicio (tiempo GMT)	Termino (tiempo GPS)
7.5 m	21:50	22:20
15 m	00:00	00:30

50 m	23:00	23:50
------	-------	-------

Tabla 3. Muestra los tiempos de inicio y termino de cada arreglo realizados en el sitio denominado RM en tiempo GMT.



Figura 3. Esquema de los arreglos realizados en el lecho del río Santa Catarina, Monterrey Nuevo León.

II.4 Arreglos Centro (PL4V).

Estos arreglos se ubicaron en un extenso terreno muy cerca del centro de la ciudad en donde se construirán algunos desarrollos comerciales y habitacionales. Dentro de este extenso terreno limitado por las avenidas Guerra, Ruiz Cortinez y Progreso se realizaron cinco arreglos de 7.5, 15, 50, 150 y 280 metros en el lugar conocido como los cuatro vientos. El centro de los arreglos tiene como coordenadas UTM 14R0368930, UTM 2842380. y en coordenadas geográficas: latitud norte 25 grados, 41 minutos y 36.2 segundos, longitud oeste 100 grados, 18 minutos y 22.5 segundos.

En la tabla 4 se muestran los tiempos en que se realizaron las mediciones y en la figura 4 se muestra en forma esquemática la posición de cada estación en los diferentes arreglos.

Arreglo	Inicio (en GMT)	Termino (en GMT)
7.5 m	21:20	21:50
15 m	22:20	22:50
50 m	23:10	23:40
150 m	00:00	00:30
280 m	01:20	01:50

Tabla4. Muestra los tiempos de inicio y termino de cada arreglo realizados en el sitio denominado RM en tiempo GMT.



Figura 4. Esquema de los arreglos realizados en el predio cercano al Centro de la ciudad de Monterrey Nuevo León.

III Equipos

Los equipos que se utilizaron para medir la vibración ambiental fueron sensores de banda ancha GURALP de 3 canales conectados a sistemas de adquisición digital marca REFTEK que cuentan con una antena de GPS para la sincronía del tiempo. Un ejemplo de una de las estaciones se puede observar en la figura 5.



Figura 5. Equipos usados en la observación de microtemores.

En el lado izquierdo en la caja gris se encuentra el sistema de adquisición digital Reftek, junto a la caja se encuentra el acumulador que provee de energía tanto al Reftek como al sensor. Del lado derecho aparece el sensor en el momento en que esta siendo orientado. La foto es de una de las estaciones del arreglo desplegado en la colonia Roma, Monterrey, Nuevo León.

IV Los Registros

Los registros de microtemores originales se grabaron en formatos reftek binarios de 10 minutos de duración. Posteriormente se utilizaron las utilerías de los programas de pascal, para unir las tres ventanas de registro de 10 minutos cada una, a fin de que se grabaran en forma consecutiva y resultaran registros de 30 minutos. Luego se pasaron de formato binario a formato ASCII, para visualizarlas y procesarlas en MATLAB.

Las ventanas que se obtuvieron de 10 minutos equivalen a 600 segundos por lo que al unir las obtuvimos ventanas de 1800 segundos de grabación, que es el equivalente a 180x103 muestras.

Al obtener un número grande de muestras nos permite tener redundancia en el análisis haciendo los resultados estadísticamente mas confiables. Por lo que con la longitud de estos registros se pudieron realizar los análisis en varias ventanas de tiempo.

V Procesado Mediante el Método de Nakamura.

Para aplicar el método de Nakamura, se consideró necesario decidir que componente horizontal se tomaría en cuenta para calcular los cocientes espectrales, o bien, de que manera combinar el efecto de los componentes horizontales para calcular dichos cocientes ya que Nakamura (1989) no especifica en su trabajo qué componente horizontal utilizar para calcular los cocientes espectrales. Hay que recordar que, cuando se trabaja con señales de microtemores es importante tomar en cuenta que las fuentes de energía son multidireccionales y por lo tanto, no se conoce la dirección de máximo movimiento. Esto permite esperar, que al considerar el vector de máxima energía horizontal, se obtengan amplitudes mayores. Por lo que los cocientes de H/V se calculan:

$$\frac{H}{V} = \frac{\sqrt{(NS(w))^2 + (EW(w))^2}}{V(w)} \quad (1)$$

Dadas estas consideraciones, en el programa de MATLAB se procede de la siguiente forma:

- Se seleccionaron las once ventanas (de 40 segundos cada una) para cada estación.
- Se realizó el suavizado de los bordes con las ventana de Von Hann (Kulhanek, 1976).
- Se calculó la transformada de Fourier (FFT).
- Se calculó la suma vectorial de los componentes horizontales en el dominio de las frecuencias.
- Se calcularon los cocientes espectrales para las once ventanas.
- Se obtuvo el promedio de los once cocientes espectrales y se calculó una desviación estándar.
- Se gráfico el promedio resultante mas/menos una desviación estándar.

Con este procedimiento se obtuvieron las graficas mostradas en las figuras de la 6 a la 47 iniciando con el sitio EST, RM, RSC y PL4V presentando los cocientes espectrales de cada arreglo realizado en cada uno de los sitios.

SITIO EST.

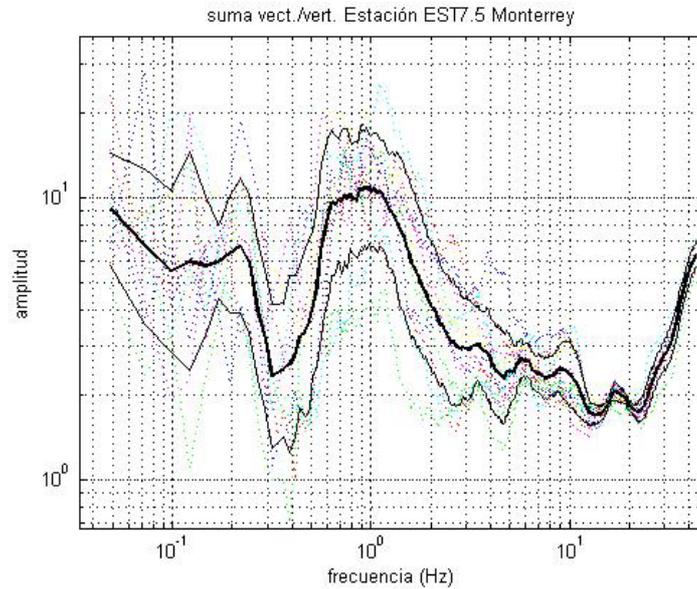


Figura 6. Cocientes espectrales H/V para la estación 1 del Estadio UANL abertura de 7.5 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

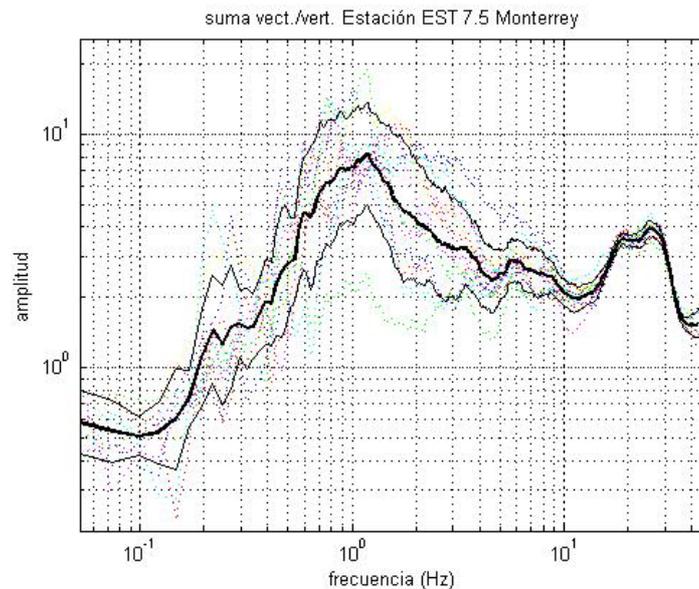


Figura 7. Cocientes espectrales H/V para la estación 2 del Estadio UANL abertura de 7.5 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

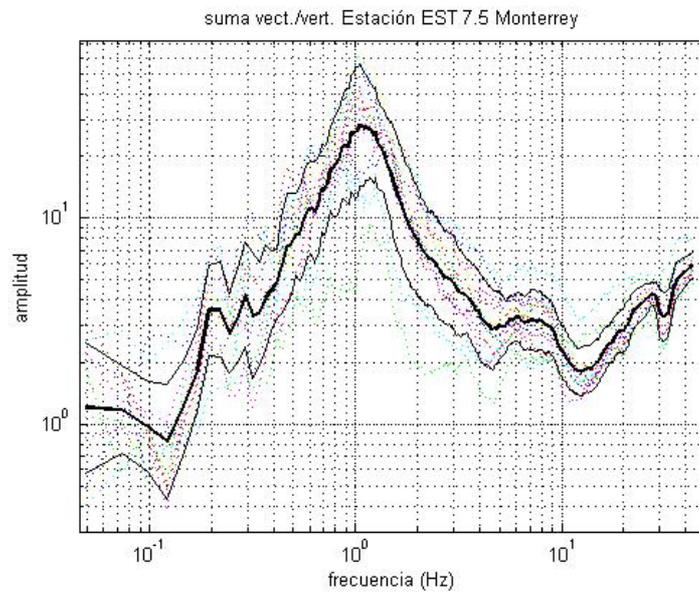


Figura 8. Cocientes espectrales H/V para la estación 3 del Estadio UANL abertura de 7.5 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

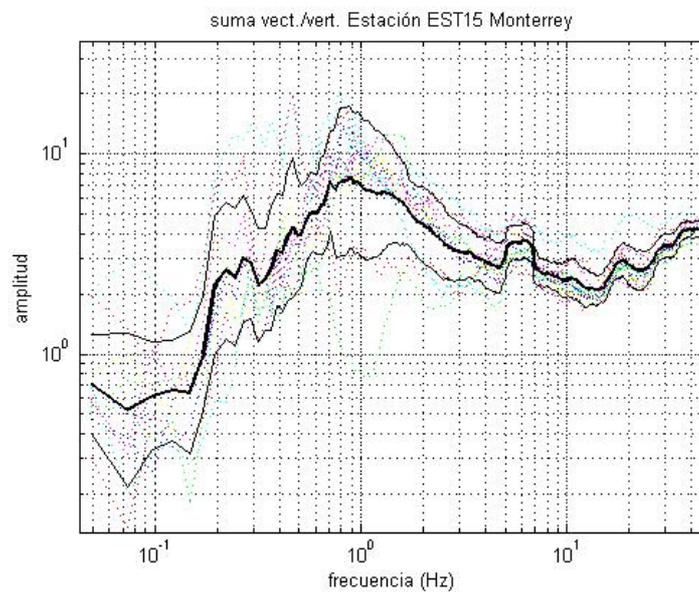


Figura 9. Cocientes espectrales H/V para la estación del Estadio UANL abertura de 15 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

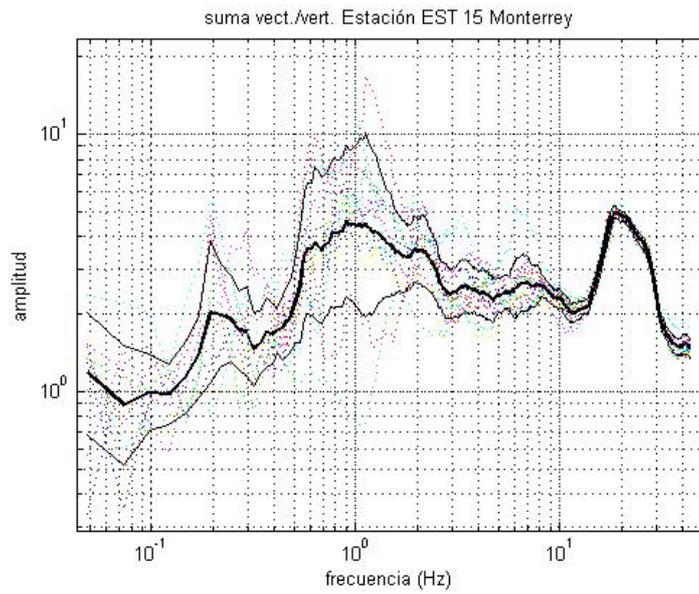


Figura 10. Cocientes espectrales H/V para la estación Estadio UANL abertura de 15 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

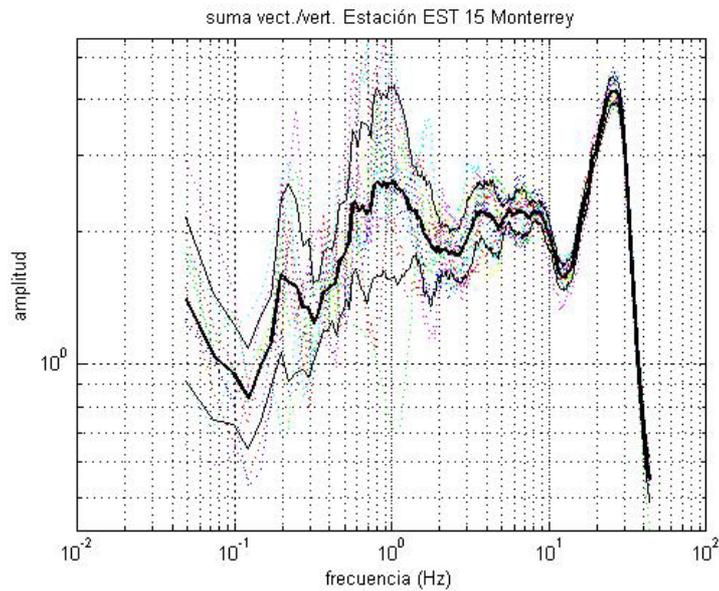


Figura 11. Cocientes espectrales H/V para la estación Estadio UANL abertura de 15 metros y para el vértice 3. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

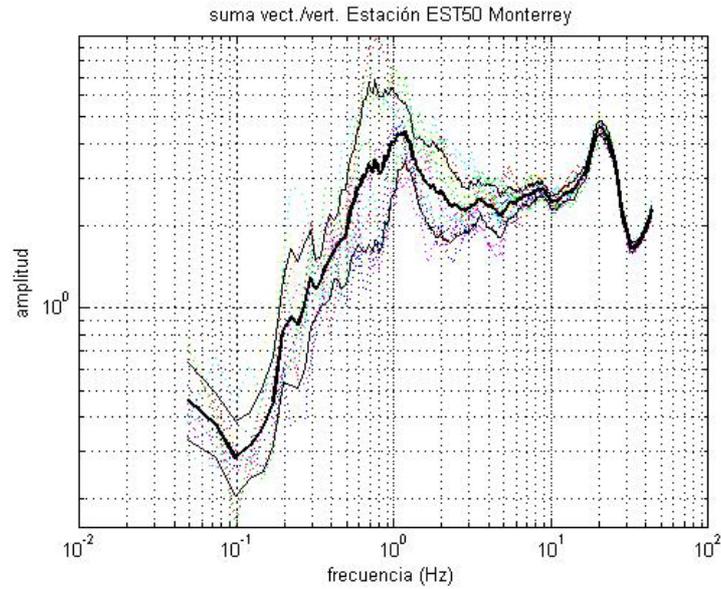


Figura 12. Cocientes espectrales H/V para la estación Estadio UANL abertura de 50 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

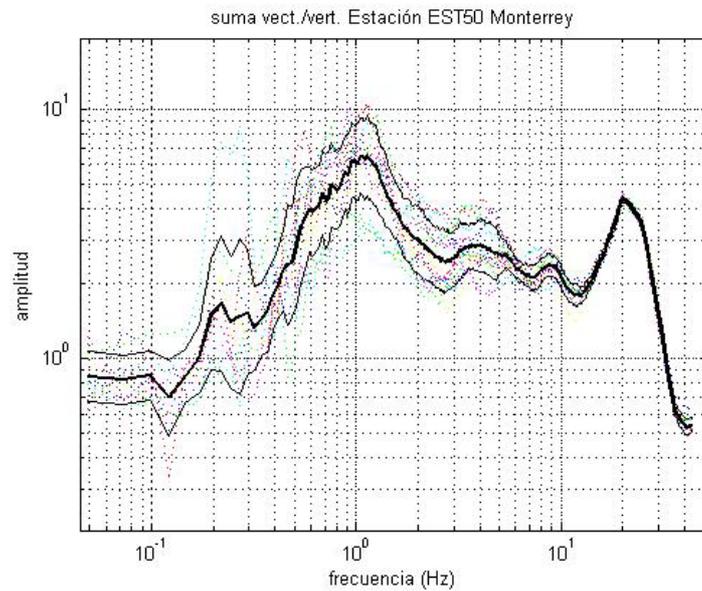


Figura 13. Cocientes espectrales H/V para la estación Estadio UANL abertura de 50 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

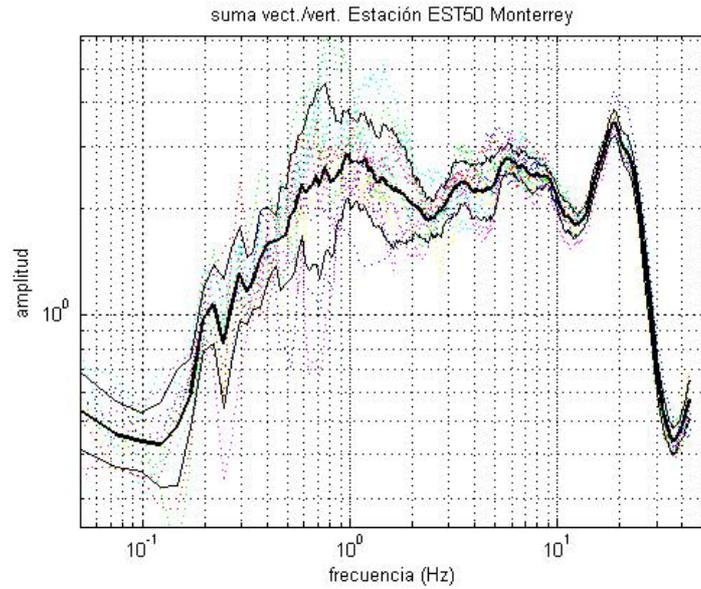


Figura 14. Cocientes espectrales H/V para la estación Estadio UANL abertura de 50 metros y para el vértice 3. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

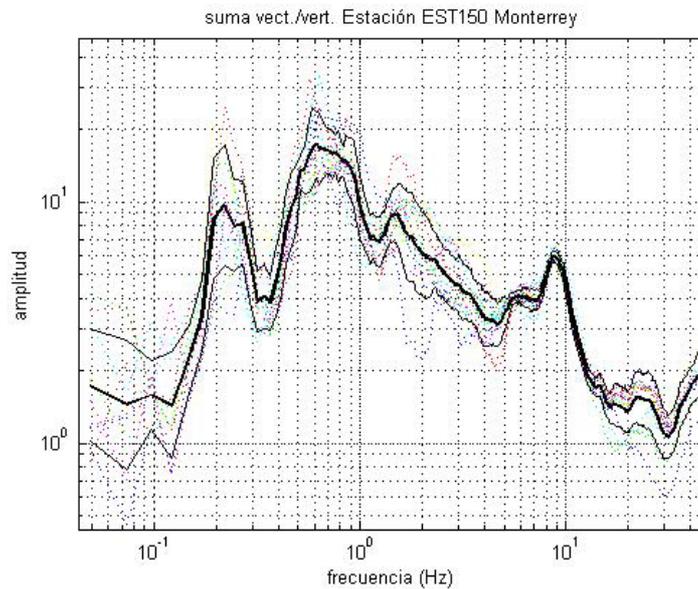


Figura 15. Cocientes espectrales H/V para la estación Estadio UANL abertura de 150 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

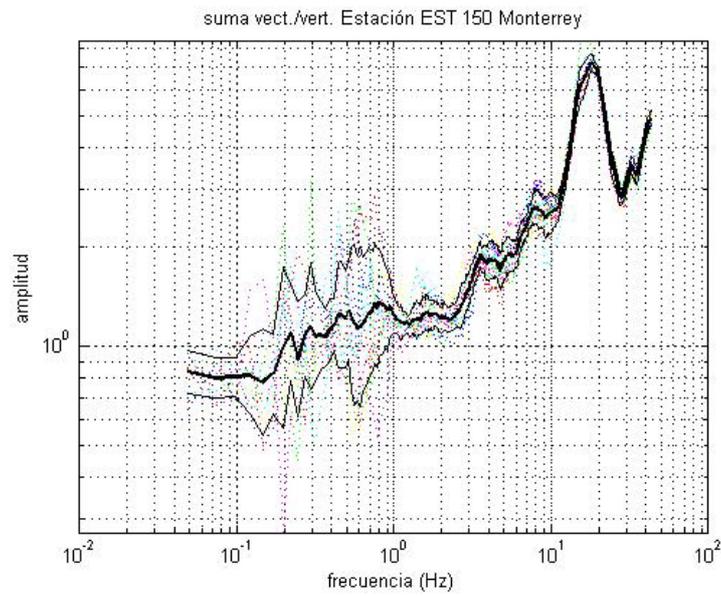


Figura 16. Cocientes espectrales H/V para la estación Estadio UANL abertura de 150 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

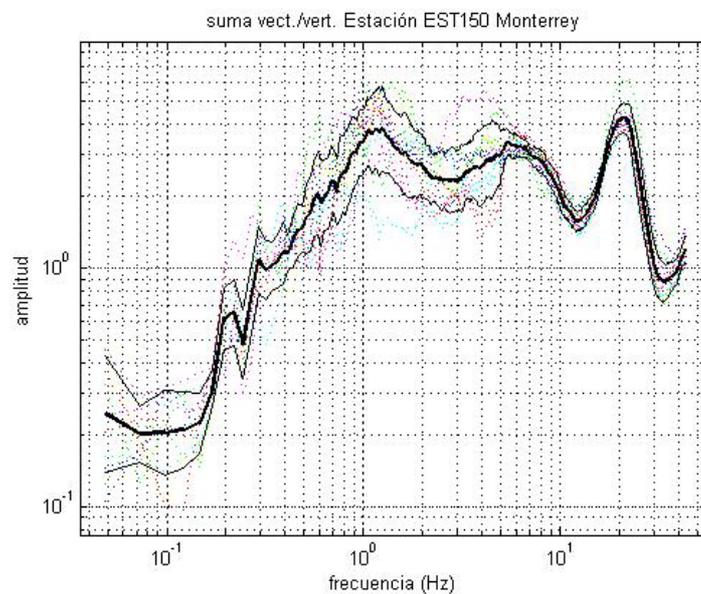


Figura 17. Cocientes espectrales H/V para la estación Estadio UANL abertura de 150 metros y para el vértice 3. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

SITIO RM.

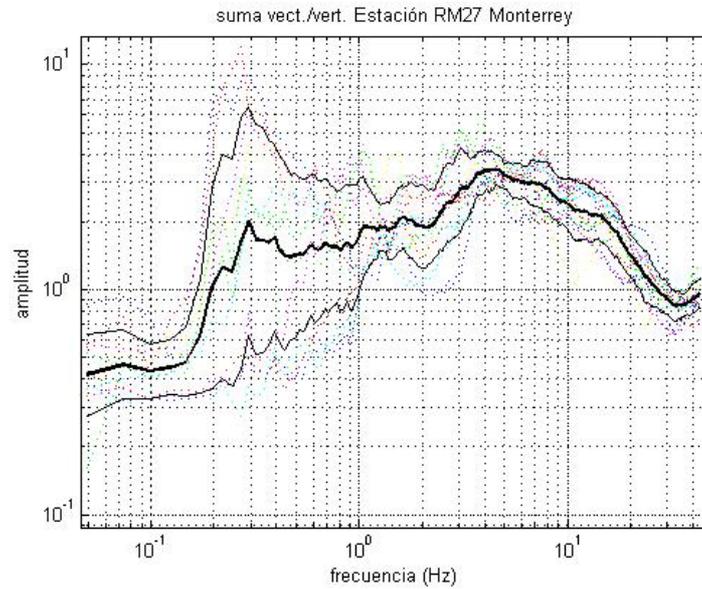


Figura 18. Cocientes espectrales H/V para el sitio ROMA, abertura de 27 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

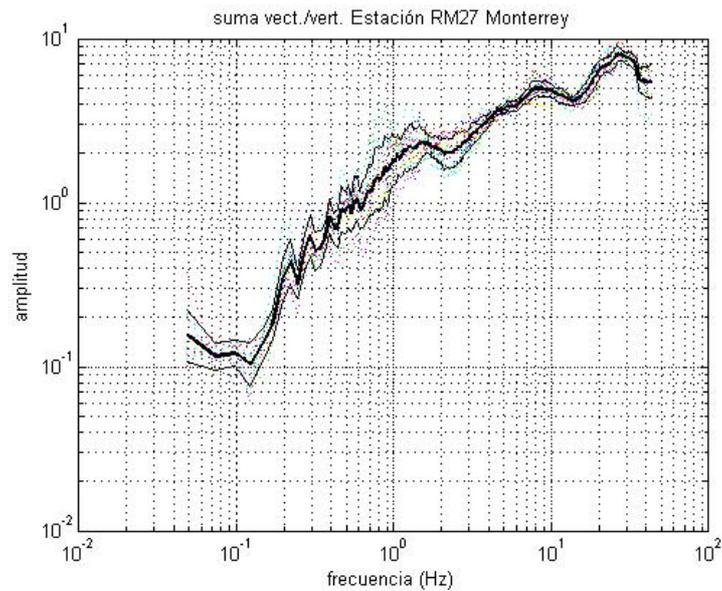


Figura 19. Cocientes espectrales H/V para el sitio ROMA, abertura de 27 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

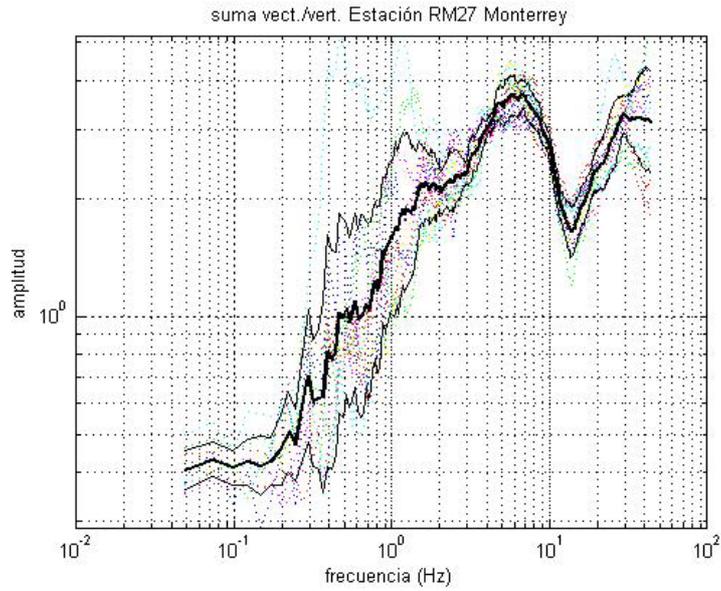


Figura 20. Cocientes espectrales H/V para el sitio ROMA, abertura de 27 metros y para el vértice 3. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

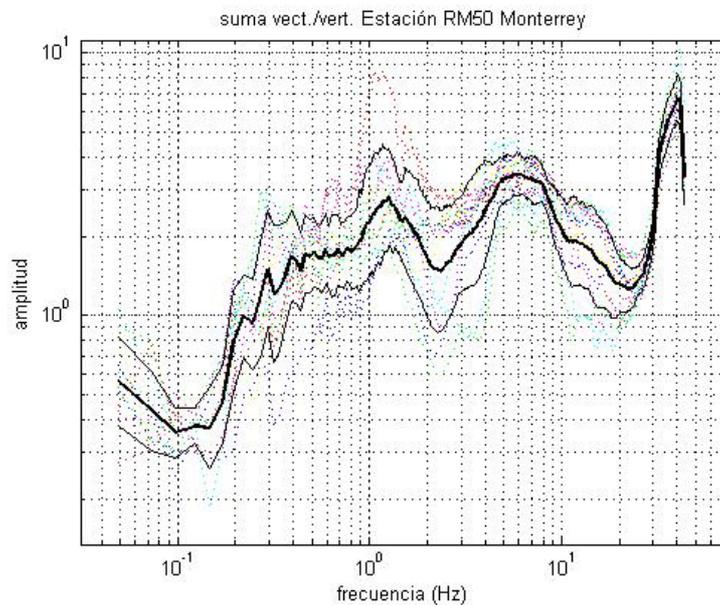


Figura 21. Cocientes espectrales H/V para el sitio ROMA, abertura de 50 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

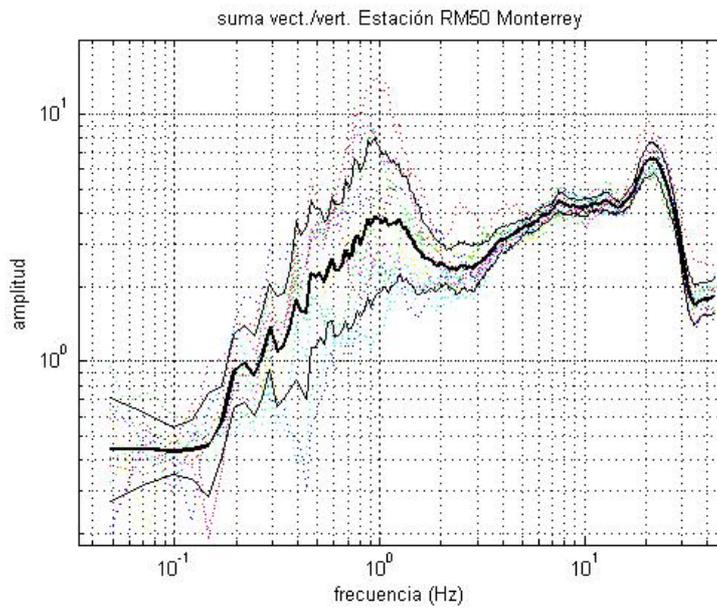


Figura 22. Cocientes espectrales H/V para el sitio ROMA, abertura de 50 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

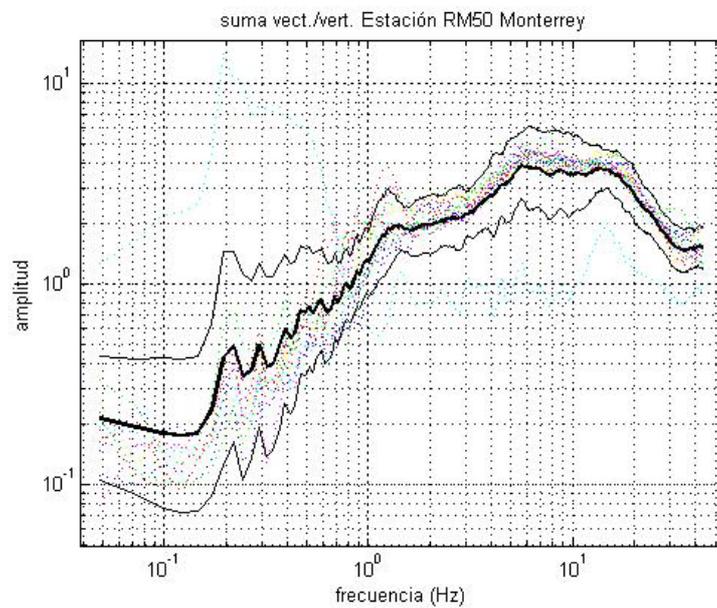


Figura 23. Cocientes espectrales H/V para el sitio ROMA, abertura de 50 metros y para el vértice 3. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

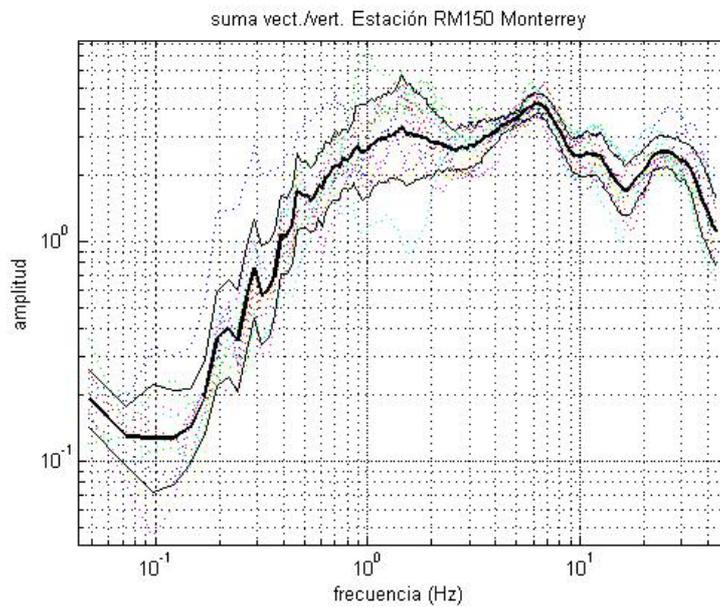


Figura 24. Cocientes espectrales H/V para el sitio ROMA, abertura de 150 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

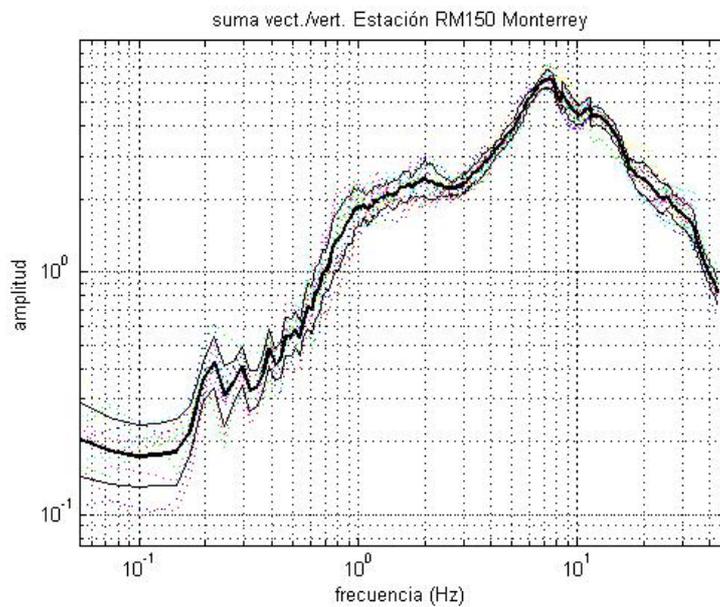


Figura 25. Cocientes espectrales H/V para el sitio ROMA abertura de 150 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

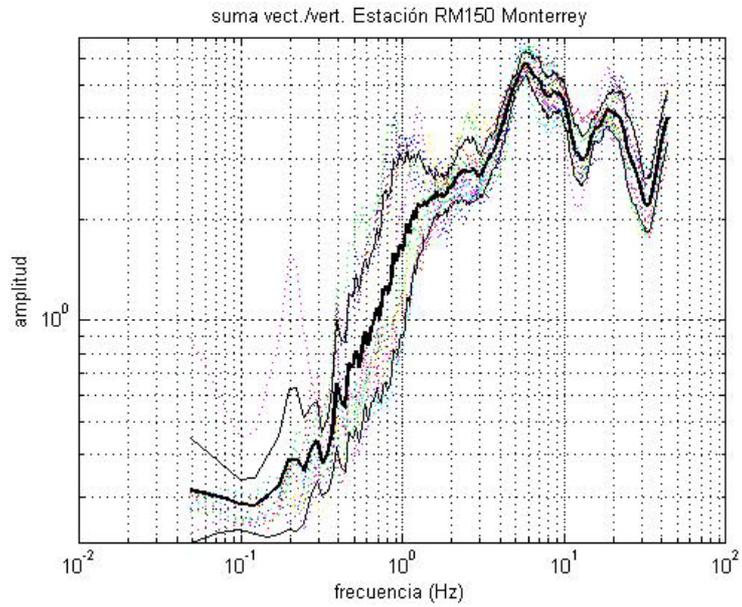


Figura 26. Cocientes espectrales H/V para el sitio ROMA, abertura de 150 metros y para el vértice 3. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

SITIO RSC

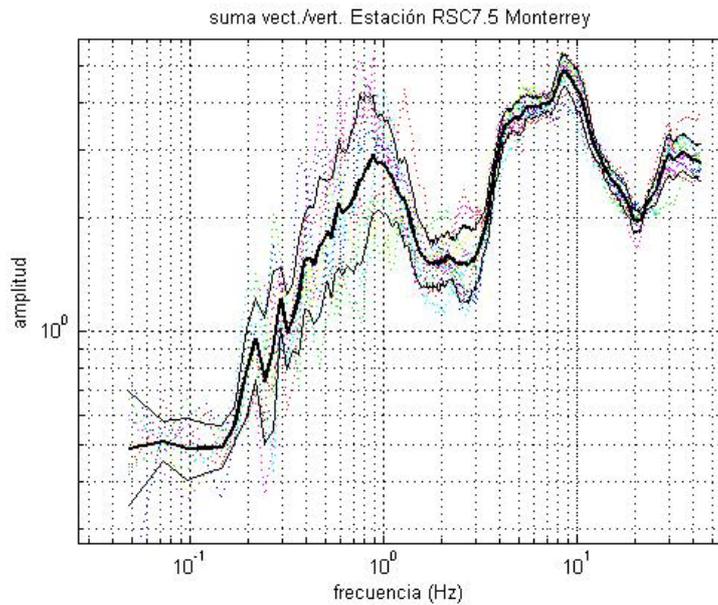


Figura 27. Cocientes espectrales H/V para el sitio Río Santa Catarina, abertura de 7.5 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

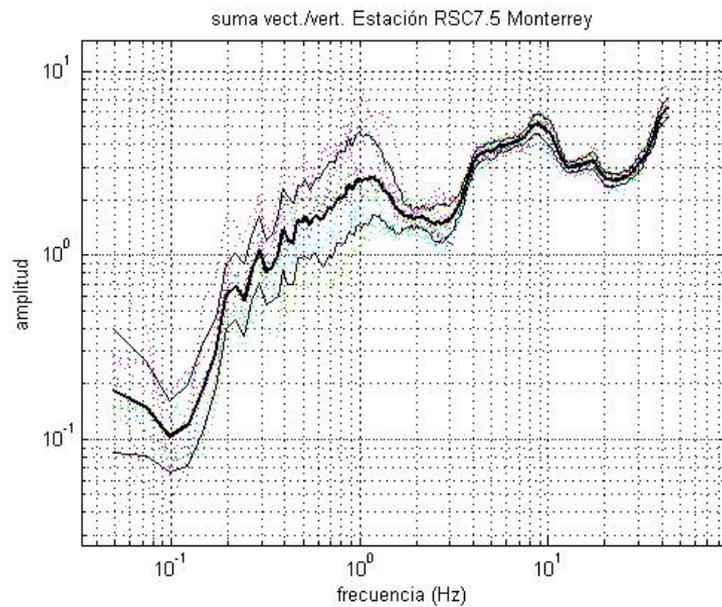


Figura 28. Cocientes espectrales H/V para el sitio Río Santa Catarina, abertura de 7.5 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

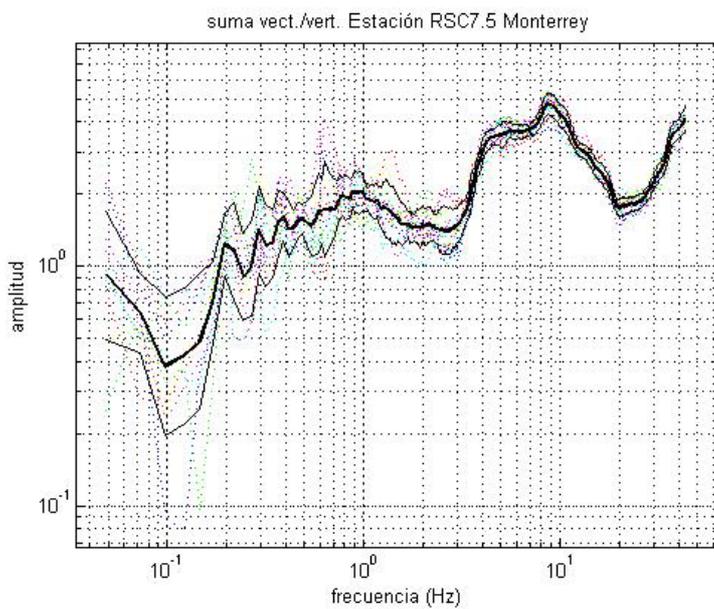


Figura 29. Cocientes espectrales H/V para el sitio Río Santa Catarina, abertura de 7.5 metros y para el vértice 3. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

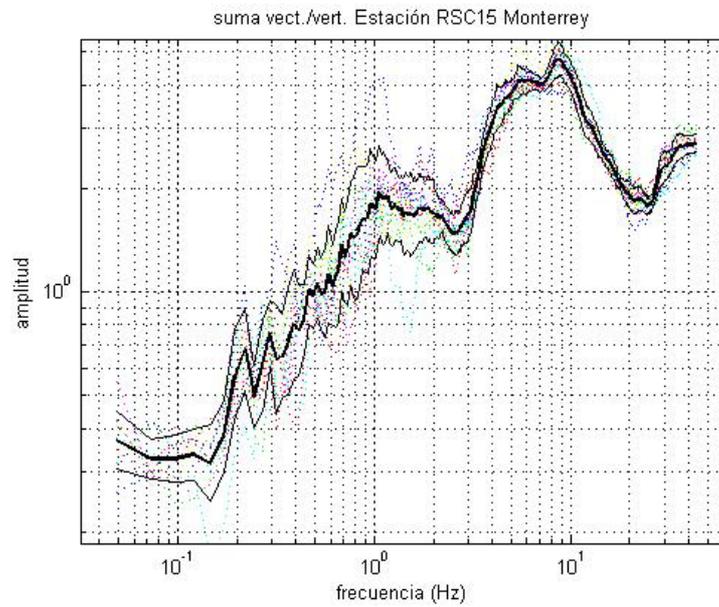


Figura 30. Cocientes espectrales H/V para el sitio Río Santa Catarina, abertura de 15 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

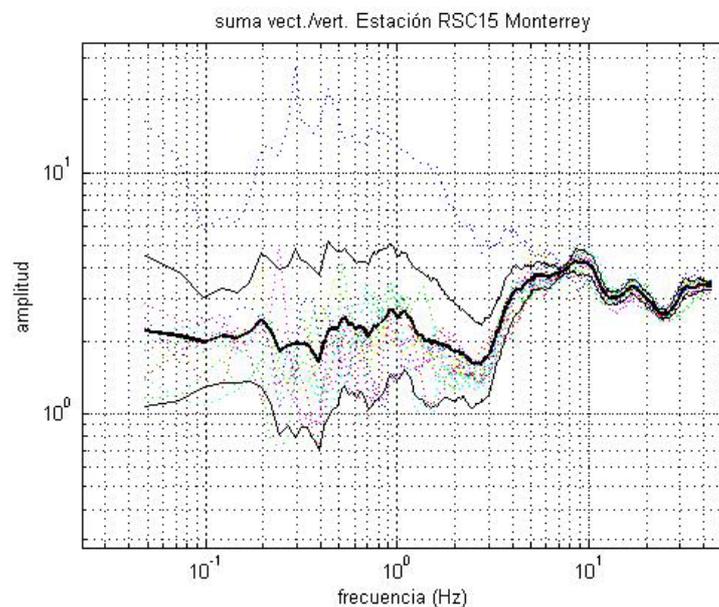


Figura 31. Cocientes espectrales H/V para el sitio Río Santa Catarina, abertura de 15 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

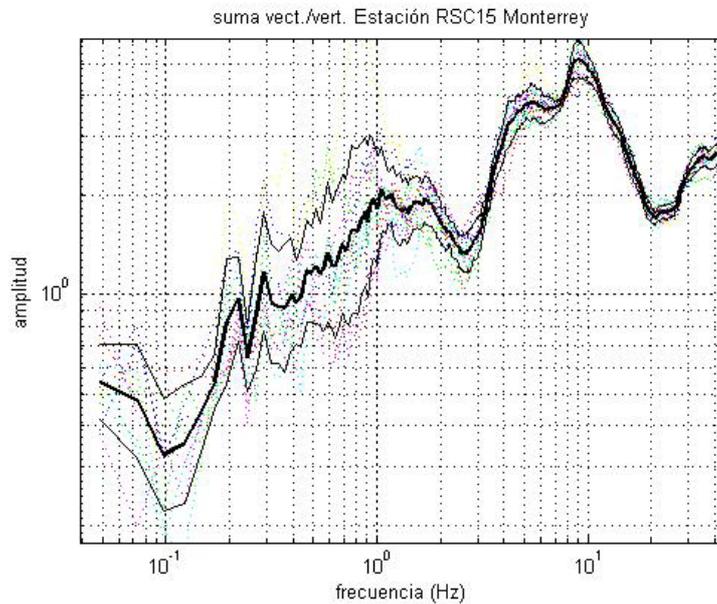


Figura 32. Cocientes espectrales H/V para el sitio Río Santa Catarina, abertura de 15 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

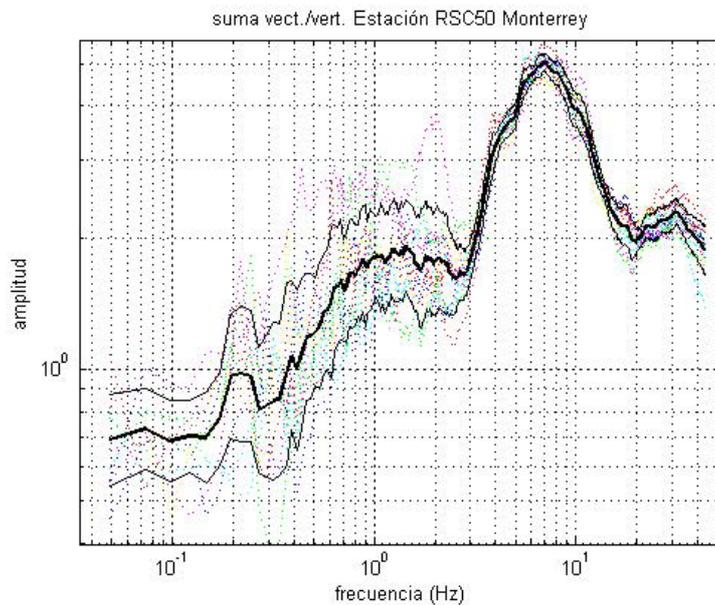


Figura 33. Cocientes espectrales H/V para el sitio Río Santa Catarina, abertura de 50 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

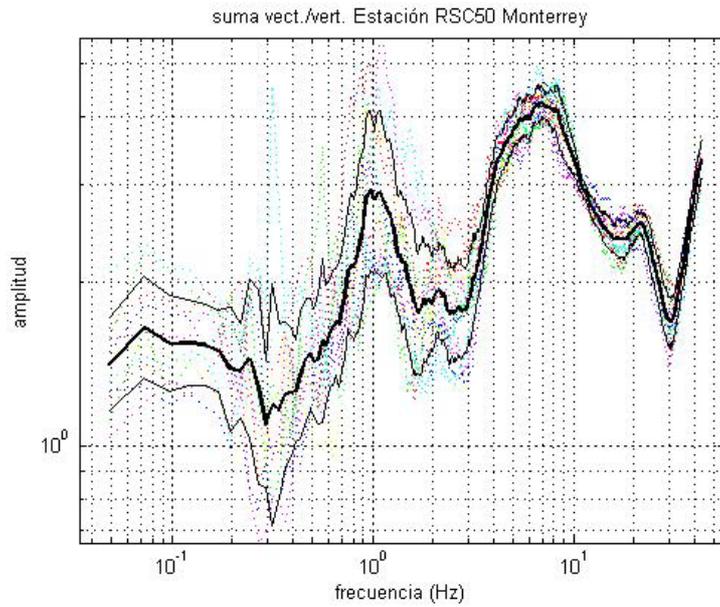


Figura 34 Cocientes espectrales H/V para el sitio Río Santa Catarina, abertura de 50 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

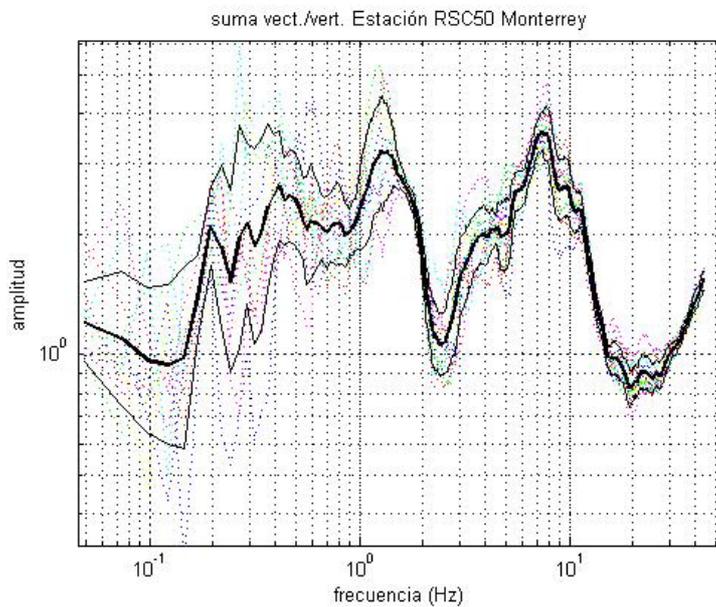


Figura 35. Cocientes espectrales H/V para el sitio Río Santa Catarina, abertura de 50 metros y para el vértice 3. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

SITIO PL4V

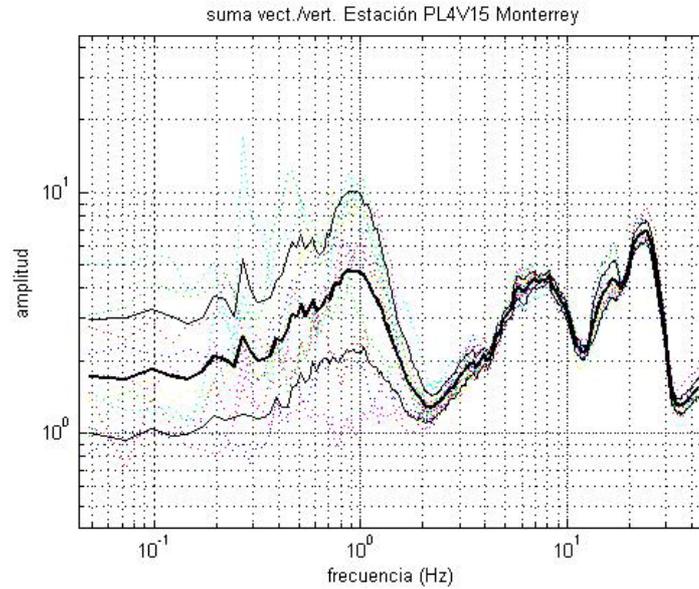


Figura 36. Cocientes espectrales H/V para el sitio Centro (predio los 4 vientos), abertura de 15 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

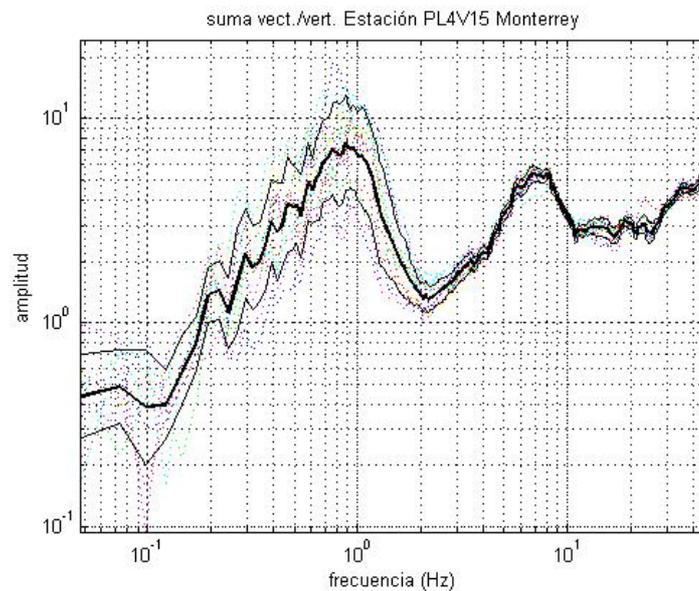


Figura 37 Cocientes espectrales H/V para el sitio Centro (predio los 4 vientos), abertura de 15 metros y para el vértice 2 En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

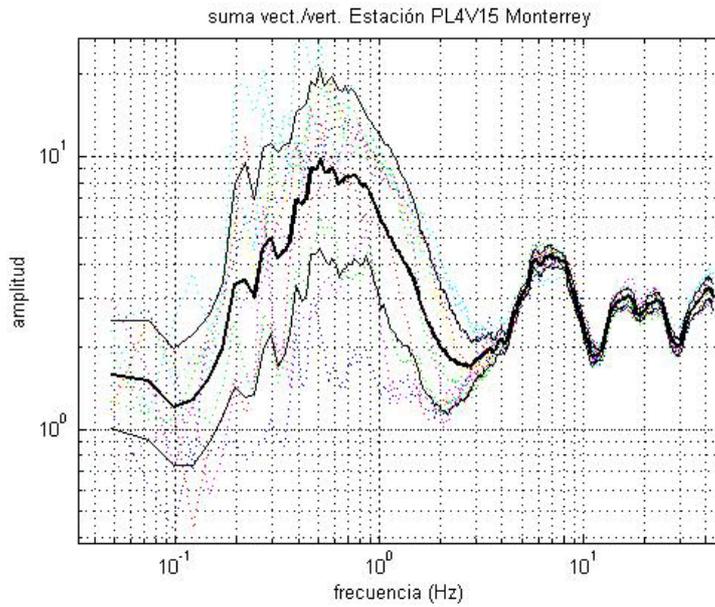


Figura 38 Cocientes espectrales H/V para el sitio Centro (predio los 4 vientos), abertura de 15 metros y para el vértice 3. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

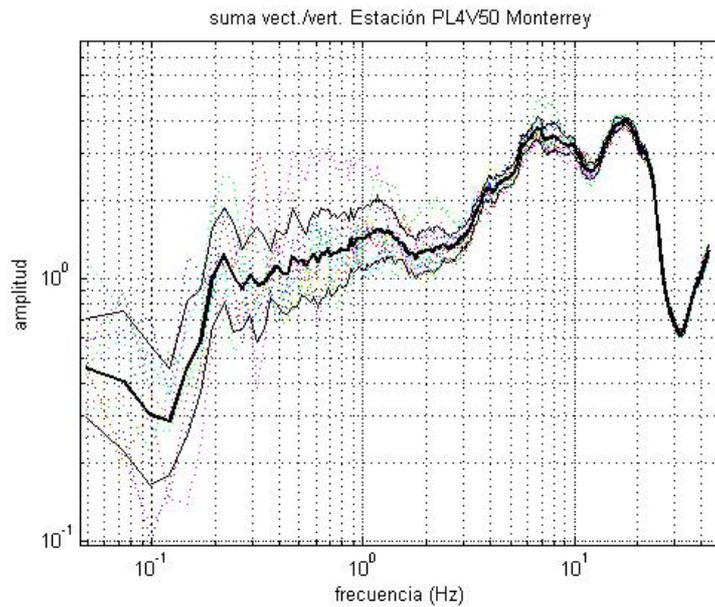


Figura 39. Cocientes espectrales H/V para el sitio Centro (predio los 4 vientos), abertura de 50 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

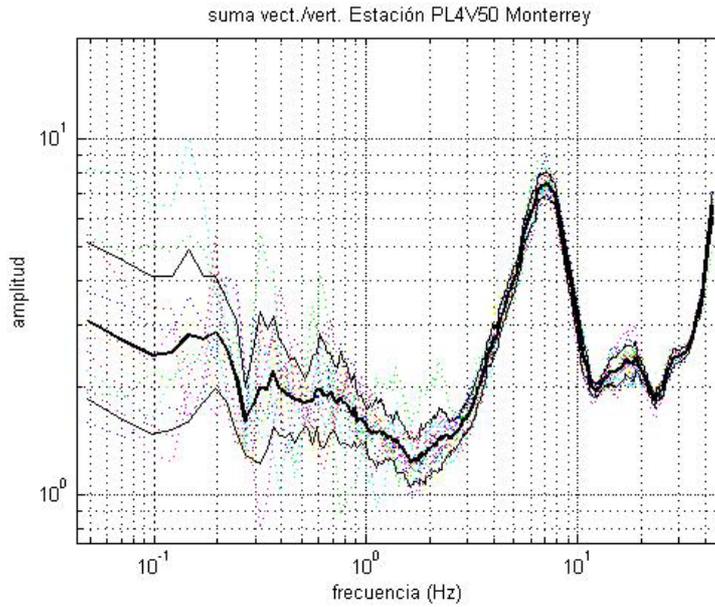


Figura 40. Cocientes espectrales H/V para el sitio Centro (predio los 4 vientos), abertura de 50 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

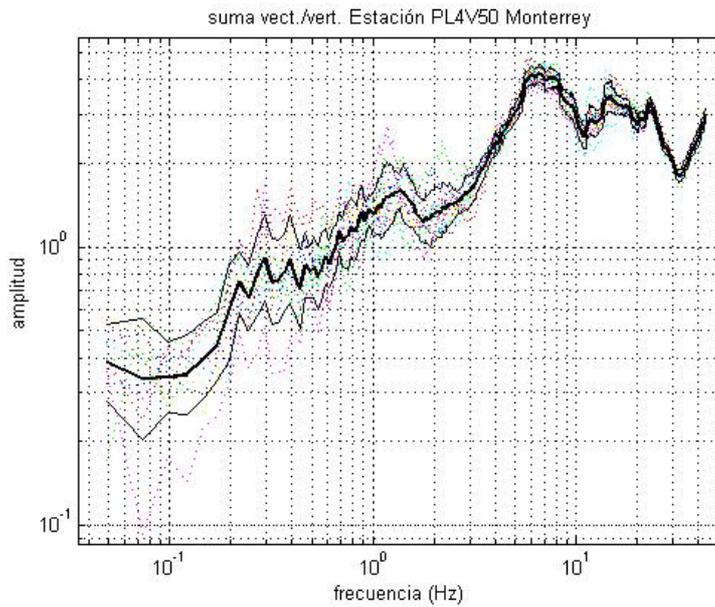


Figura 41. Cocientes espectrales H/V para el sitio Centro (predio los 4 vientos), abertura de 50 metros y para el vértice 3. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

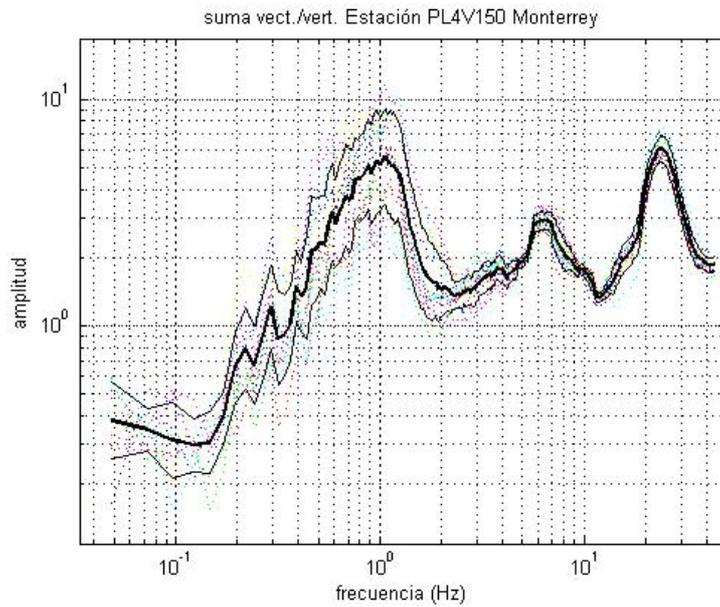


Figura 42. Cocientes espectrales H/V para el sitio Centro (predio los 4 vientos), abertura de 150 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

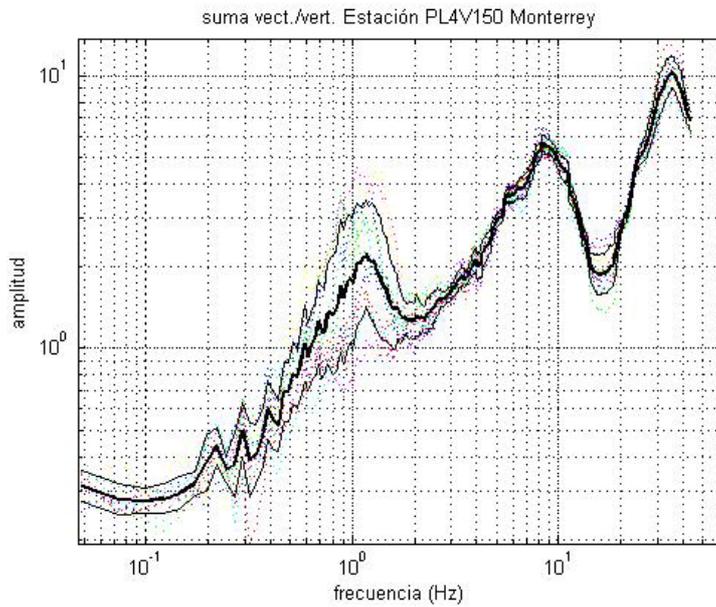


Figura 43. Cocientes espectrales H/V para el sitio Centro (predio los 4 vientos), abertura de 150 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

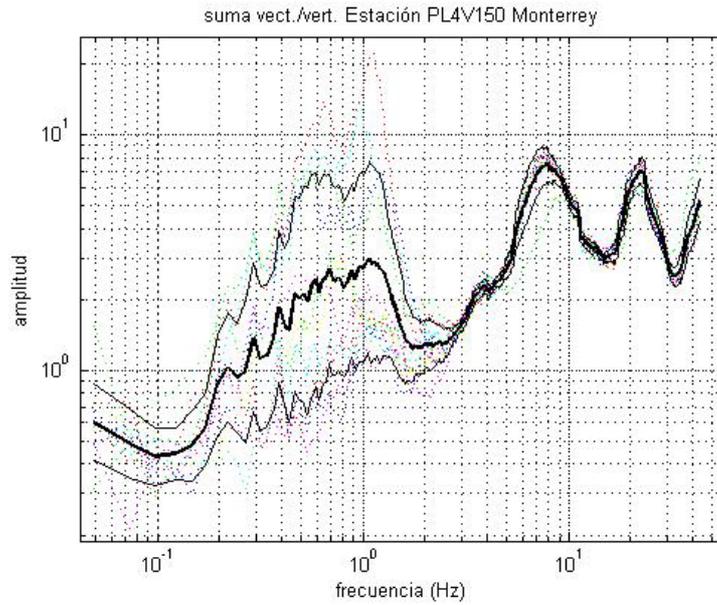


Figura 44. Cocientes espectrales H/V para el sitio Centro (predio los 4 vientos), abertura de 150 metros y para el vértice 3. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

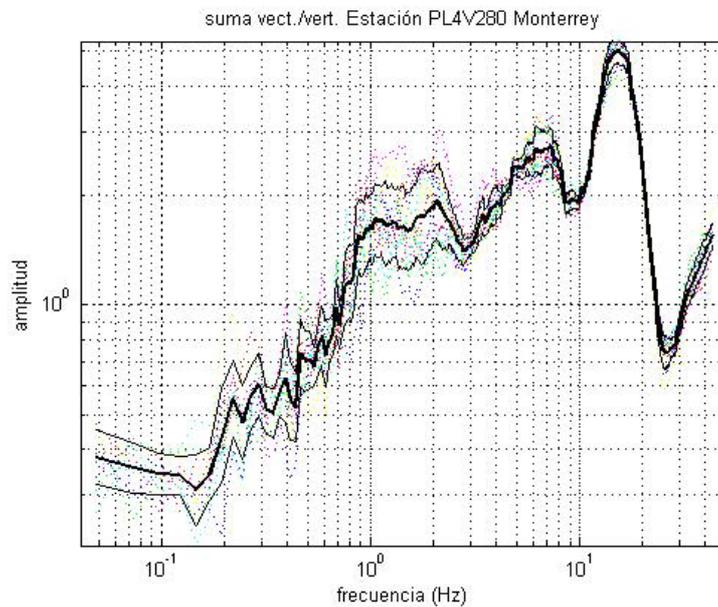


Figura 45. Cocientes espectrales H/V para el sitio Centro (predio los 4 vientos), abertura de 280 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

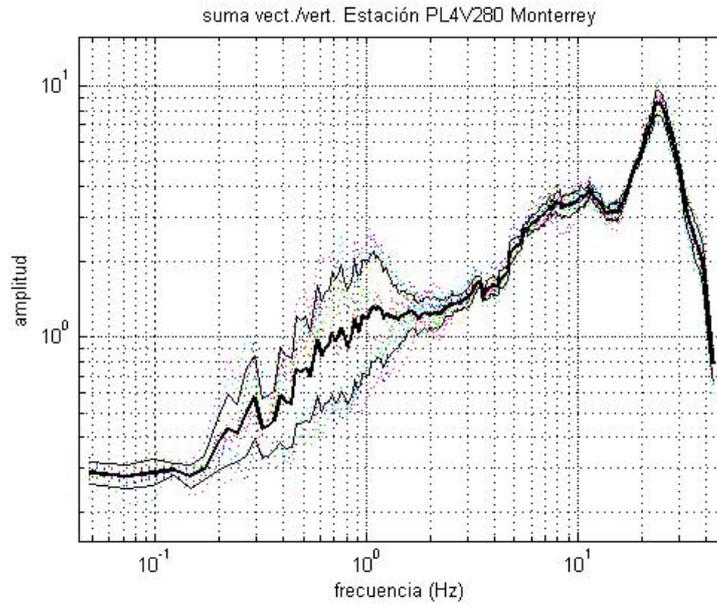


Figura 46. Cocientes espectrales H/V para el sitio Centro (predio los 4 vientos), abertura de 280 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

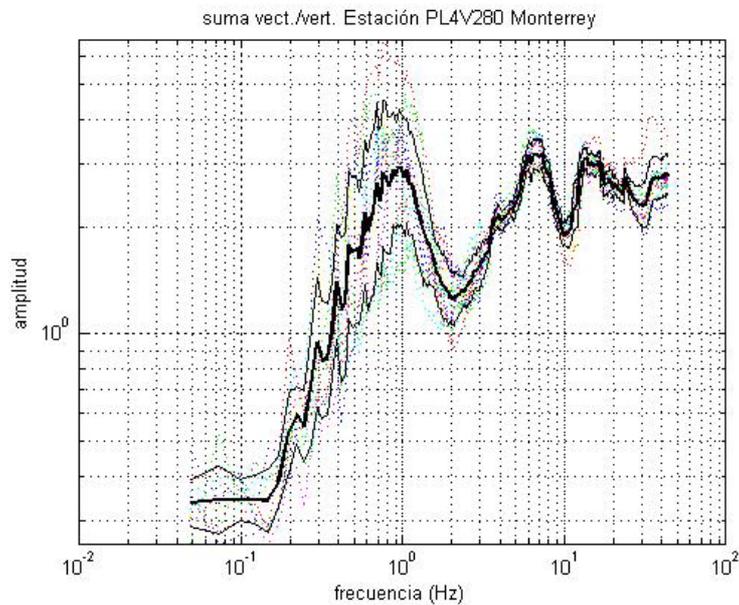


Figura 47. Cocientes espectrales H/V para la el sitio Centro (predio los 4 vientos), abertura de 280 metros y para el vértice 3. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

Tabla 5. Frecuencias y periodos dominantes encontrados para los arreglos del estacionamiento del estadio de futbol de la Universidad Autónoma de Nuevo León

Vértice	7.5 m (f)	7.5 m (To)	15 m (f)	15 m (To)	50 m (f)	50 m (To)	150 m (f)	150 m (To)
I	0.85	1.18	0.85	1.18	1.2	0.83	0.6	1.67
II	1.2	0.83	0.9	1.11	1.2	0.83	0.8	1.25
III	1.0	1.0	1.0	1.0	0.95	1.05	1.2	0.83

Tabla 6. Frecuencias y periodos dominantes encontrados para los arreglos Roma.

Vértice	27 m (f)	27 m (To)	50 m (f)	50 m (To)	150 m (f)	150 m (To)
I	4.5	0.22	6.5	0.15	6.5	0.15
II	8.0	0.13	0.95	1.05	7.5	0.13
III	7.5	0.13	5.5	0.18	5.5	0.18

Tabla 7. Frecuencias y periodos dominantes encontrados para los arreglos en el lecho del Río Santa Catarina

Vértice	7.5 m (f)	7.5 m (To)	15 m (f)	15 m (To)	50 m (f)	50 m (To)
I	8.5/0.9	0.12/1.11	8.5/1.0	0.12/1.00	7.0/1.44	0.14/0.69
II	9.0/1.2	0.11/0.83	9.0/-	0.11/-	6.5/0.95	0.15/1.05
III	9.0/-	0.11/-	9.0/1.0	0.11/1.00	7.5/1.2	0.13/0.83

Tabla 8. Frecuencias y periodos dominantes encontrados para los arreglos del Centro, Predio los cuatro vientos.

Vértice	15 m (f)	15 m (To)	50 m (f)	50 m (To)	150 m (f)	150 m (To)	280 m (f)	280 m (To)
I	8.0/1.0	0.13/1.00	7.0/-	0.14/-	6.5/1.0	0.15/1.0	7.0/2.0	0.14/0.50
II	7.0/0.9	0.14/1.11	7.0/-	0.14/-	8.5/1.2	0.12/0.83	11.0/-	0.09/-
III	7.0/0.5	0.14/2.0	7.0/-	0.14/-	7.5/1.1	0.13/0.91	6.5/0.9	0.15/1.11

En las Tablas de la 5 a la 8 se muestran los resultados de las frecuencias dominantes y su conversión a periodos. Como se puede apreciar en los cocientes tanto de los arreglos observados junto al lecho del Río Santa Catarina así como los observados en el sitio que hemos llamado el Centro en la localidad denominada los cuatro vientos, estos presentan dos picos muy notorios por lo que en vez de considerar únicamente una frecuencia dominante se consideran por el momento los dos picos.

Prámos decir en resumen que para el estacionamiento de la UANL se tiene 1.06 segundos de periodo dominante en promedio, con variaciones entre 0.83 y 1.67 segundos. Para las mediciones realizadas en Roma, el promedio es de 0.26 segundos. En este caso si omitimos la lectura del vértice 2 en la abertura de 50 metros, que resultó

anómala con respecto a las demás, el promedio es de 0.16 segundos, con variaciones entre 0.13 y 0.22. Las mediciones realizadas en los arreglos del lecho del Río Santa Catarina tienen un promedio de 0.12 segundos para uno de los periodos predominantes observados y 0.93 segundos para el otro, con rangos de 0.11 a 0.15 segundos y de 0.69 a 1.11 segundos, respectivamente. Note que no en todos los cocientes se observaron dos picos por lo que en lugares en donde no se uno de los dos picos no se considero para calcular el promedio. Finalmente para el predio de los cuatro vientos los promedios fueron de 0.13 y 1.06 segundos, cada uno de ellos con variaciones entre 0.09 y 0.15 segundos y 0.5 y 2.0 segundos respectivamente.

Referencias

Servicios de consulta en línea : [//www.googleearth.com](http://www.googleearth.com).

Nakamura, Y., (1989), "A method for dynamic characteristics estimation of surface using microtremor on the ground surface. *QR of R.T. r.*, 30-1.

Singh S. K., M. Rodriguez y L. Esteva (1983), "Statistics of Small Earthquakes and frequency of Occurrence of large Earthquakes Along the Mexican Subduction Zone". *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73 No.6, pp 1779-1796.

Vazquez Rosas R,(2002),"Propuesta de microzonificación sísmica para la ciudad de Uruapan Michoacán". *Tesis de licenciatura ., Facultad de Ingeniería UMSNH Morelia Mich. Noviembre 2002*

Vazquez Rosas R,(2002),"Propuesta de microzonificación sísmica para la ciudad de Zamora Michoacán". *Memorias del XV congreso de Ingeniería sísmica SMIS, México 2005. part .III-02*

Estudio de vibración ambiental en arreglos instrumentales en la ciudad de Monterrey, Nuevo León.

Ricardo Vázquez Rosas, Jorge Aguirre González, Juan C. Montalvo A. y Horacio Mijares A.

Objetivos:

El objetivo de este proyecto es colaborar con el Dr. Juan Carlos Montalvo Arrieta de la Facultad de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Nuevo León para medir la vibración ambiental en varios sitios de la ciudad de Monterrey. Con esta información se pretende contribuir al estudio de los efectos de sitio mediante la determinación de los periodos dominantes y la inversión de estructuras de velocidad aplicando el método H/V (de Nakamura) y SPAC, respectivamente.

Resumen

Una de las partes fundamentales en todo estudio de riesgo sísmico es la evaluación del efecto de sitio. Para éste fin, y como primer acercamiento, se realizan mediciones de vibración ambiental (microtremores) en estaciones aisladas. Con estos registros es posible obtener periodos dominantes de ese sitio usando el método H/V (de Nakamura), cuando existen fuertes contrastes de impedancia. Aunque el periodo dominante es una información importante no nos proporciona mayor información sobre la estratigrafía. En contraste, el método SPAC (Spatial Auto-correlation Method) a través de la curva de dispersión de ondas Rayleigh, permite estimar la estructura de velocidades. El método SPAC requiere de arreglos instrumentales en donde los microtremores son observados simultáneamente en varias estaciones (típicamente 4). Por lo cual, se propone realizar arreglos instrumentales distribuidos en toda la ciudad de Monterrey con una densidad uniforme, lo que permitirá usar los datos para los dos fines planteados. Los instrumentos que se usaran serán sensores Guralp de 30 segundos conectados a un sistema de adquisición DAS de Reftek

II. Descripción de los arreglos

En cuatro localidades de la Ciudad de Monterrey se desplegaron arreglos consistenetes ede tres estaciones localizadas en los vertices de triangulos equilateros con diferentes aberturas. Las mediciones se realizaron en forma simultanea. Las aberturas variaron de acuerdo a las condiciones de cada punto de observación siendo el arreglo mas grande de 280 metros en la localidad que llamamos Centro. A continuación realizamos la descripción de cada una de las localidades en donde se realizaron los arreglos.

II.1 Arreglos Estadio UANL (EST).

Este sitio se ubicó en el estacionamiento del estadio de fútbol de la Universidad Autónoma de Nuevo León y colinda con la avenida Universidad. Las coordenadas del punto central son: latitud norte 25 grados, 43 minutos y 11.9 segundos, Longitud oeste 100 grados, 18 minutos y 54.3 segundos. En este sitio se realizaron cuatro arreglos con aberturas de 7.5, 15, 50 y 150 metros. Por ser este el sitio donde se iniciaron las mediciones, previo a los arreglos se realizó una prueba de calibración. La prueba consistió en observar microtremores por un lapso de tiempo de 20 minutos con todos los

sensores juntos. En la siguiente tabla 1 se muestran los tiempos de medición según cada arreglo.

Arreglo	Inicio (en GMT)	Termino (en GMT)
Calibración	21:20	21:40
7.5 m	22:20	22:50
15 m	23:10	23:40
50 m	23:50	00:20
150 m	01:00	01:30

Tabla 1. Muestra los tiempos de inicio y termino de cada arreglo realizados en el sitio denominado EST en tiempo GMT.

En la figura 1 se muestra gráficamente la localización de los arreglos y la posición relativa de cada estación.

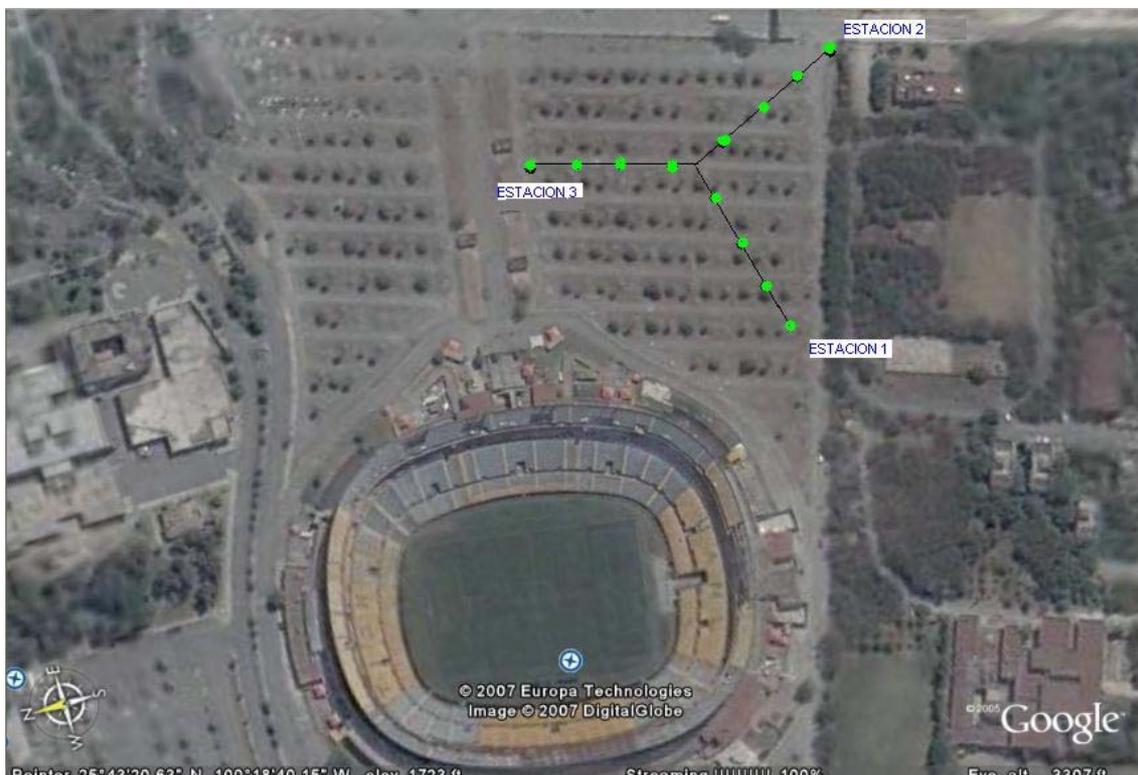


Figura 1. Esquema de los arreglos realizados en el estacionamiento del estadio de fútbol de la Universidad Autónoma de Nuevo León (google earth).

II.2 Arreglos Roma (RM).

Estos arreglos se realizaron en un parque de la colonia Roma y calles aledañas. Las coordenadas del centro de los arreglos son: latitud norte 25 grados, 39 minutos y 9.8 segundos, longitud oeste 100 grados, 17 minutos y 45.8 segundos. En esta localidad realizamos arreglos a 27, 50 y 150 metros de abertura con respecto al centro. En la tabla 2 se indican los tiempos en que se realizaron las lecturas y en la figura 2 se muestra la posición del arreglo en forma esquemática.

Arreglo	Inicio (tiempo GMT)	Termino (tiempo GPS)
27 m	20:20	20:50
50 m	19:40	20:10
150 m	18:50	19:20

Tabla 2. Muestra los tiempos de inicio y termino de cada arreglo realizados en el sitio denominado RM en tiempo GMT.

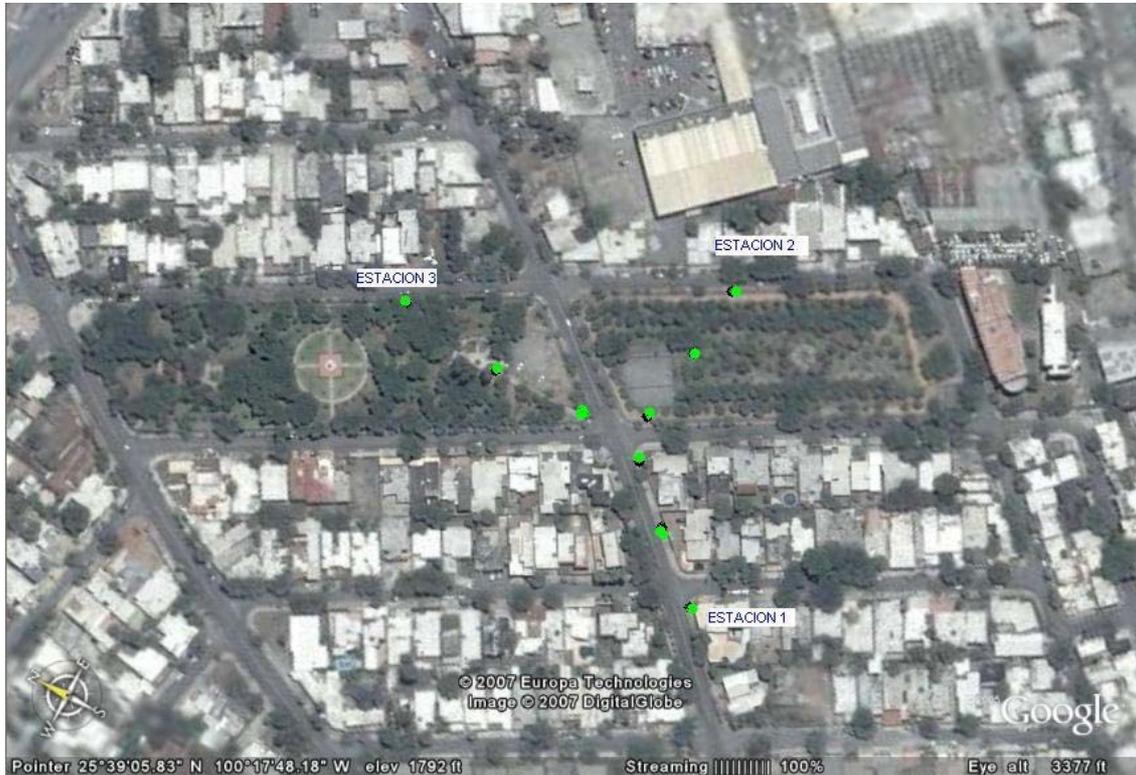


Figura 2. Esquema de los arreglos realizados en un parque ubicado en la colonia Roma (google earth).

II.3 Arreglo Lecho del Río Santa Catarina (RSC).

Estos arreglos se localizaron en el borde oriente del lecho del río Santa Catarina. Este lugar se usa para practicar el softball. De hecho, uno de los arreglos tuvo que ser interrumpido por el inicio de un partido. Ese arreglo fue repetido y aquí solo se considera cuando se pudo completar la medición continua de 30 minutos. Debido a las dimensiones del terreno se realizaron únicamente 3 tamaños de arreglos de 7.5, 15 y 50 metros. Las coordenadas del centro del arreglo son: latitud norte 25 grados, 39 minutos y 51.6 segundos, longitud oeste 100 grados, 19 minutos y 17.5 segundos. En la tabla 3 se indican los tiempos en que se realizaron las lecturas y en la figura 3 se muestra la ubicación de las estaciones en cada arreglo.

Arreglo	Inicio (tiempo GMT)	Termino (tiempo GPS)
7.5 m	21:50	22:20
15 m	00:00	00:30
50 m	23:00	23:50

Tabla 3. Muestra los tiempos de inicio y termino de cada arreglo realizados en el sitio denominado RM en tiempo GMT.



Figura 3. Esquema de los arreglos realizados en el lecho del río Santa Catarina, Monterrey Nuevo León.

II.4 Arreglos Centro (PL4V).

Estos arreglos se ubicaron en un extenso terreno muy cerca del centro de la ciudad en donde se construirán algunos desarrollos comerciales y habitacionales. Dentro de este extenso terreno limitado por las avenidas Guerra, Ruiz Cortinez y Progreso se realizaron cinco arreglos de 7.5, 15, 50, 150 y 280 metros en el lugar conocido como los cuatro vientos. El centro de los arreglos tiene como coordenadas UTM 14R0368930, UTM 2842380. y en coordenadas geográficas: latitud norte 25 grados, 41 minutos y 36.2 segundos, longitud oeste 100 grados, 18 minutos y 22.5 segundos.

En la tabla 4 se muestran los tiempos en que se realizaron las mediciones y en la figura 4 se muestra en forma esquemática la posición de cada estación en los diferentes arreglos.

Arreglo	Inicio (en GMT)	Termino (en GMT)
7.5 m	21:20	21:50
15 m	22:20	22:50
50 m	23:10	23:40
150 m	00:00	00:30
280 m	01:20	01:50

Tabla4. Muestra los tiempos de inicio y termino de cada arreglo realizados en el sitio denominado RM en tiempo GMT.



Figura 4. Esquema de los arreglos realizados en el predio cercano al Centro de la ciudad de Monterrey Nuevo León.

III Equipos

Los equipos que se utilizaron para medir la vibración ambiental fueron sensores de banda ancha GURALP de 3 canales conectados a sistemas de adquisición digital marca REFTEK que cuentan con una antena de GPS para la sincronía del tiempo. Un ejemplo de una de las estaciones se puede observar en la figura 5.



Figura 5. Equipos usados en la observación de microtemores.

En el lado izquierdo en la caja gris se encuentra el sistema de adquisición digital Reftek, junto a la caja se encuentra el acumulador que provee de energía tanto al Reftek como al sensor. Del lado derecho aparece el sensor en el momento en que esta siendo orientado. La foto es de una de las estaciones del arreglo desplegado en la colonia Roma, Monterrey, Nuevo León.

IV Los Registros

Los registros de microtemores originales se grabaron en formatos reftek binarios de 10 minutos de duración. Posteriormente se utilizaron las utilerías de los programas de pascal, para unir las tres ventanas de registro de 10 minutos cada una, a fin de que se grabaran en forma consecutiva y resultaran registros de 30 minutos. Luego se pasaron de formato binario a formato ASCII, para visualizarlas y procesarlas en MATLAB.

Las ventanas que se obtuvieron de 10 minutos equivalen a 600 segundos por lo que al unir las obtuvimos ventanas de 1800 segundos de grabación, que es el equivalente a 180x103 muestras.

Al obtener un número grande de muestras nos permite tener redundancia en el análisis haciendo los resultados estadísticamente mas confiables. Por lo que con la longitud de estos registros se pudieron realizar los análisis en varias ventanas de tiempo.

V Procesado Mediante el Método de Nakamura.

Para aplicar el método de Nakamura, se consideró necesario decidir que componente horizontal se tomaría en cuenta para calcular los cocientes espectrales, o bien, de que manera combinar el efecto de los componentes horizontales para calcular dichos cocientes ya que Nakamura (1989) no especifica en su trabajo qué componente horizontal utilizar para calcular los cocientes espectrales. Hay que recordar que, cuando se trabaja con señales de microtemores es importante tomar en cuenta que las fuentes de energía son multidireccionales y por lo tanto, no se conoce la dirección de máximo movimiento. Esto permite esperar, que al considerar el vector de máxima energía horizontal, se obtengan amplitudes mayores. Por lo que los cocientes de H/V se calculan:

$$\frac{H}{V} = \frac{\sqrt{(NS(w))^2 + (EW(w))^2}}{V(w)} \quad (1)$$

Dadas estas consideraciones, en el programa de MATLAB se procede de la siguiente forma:

- Se seleccionaron las once ventanas (de 40 segundos cada una) para cada estación.
- Se realizó el suavizado de los bordes con las ventana de Von Hann (Kulhanek, 1976).
- Se calculó la transformada de Fourier (FFT).
- Se calculó la suma vectorial de los componentes horizontales en el dominio de las frecuencias.
- Se calcularon los cocientes espectrales para las once ventanas.
- Se obtuvo el promedio de los once cocientes espectrales y se calculó una desviación estándar.
- Se gráfico el promedio resultante mas/menos una desviación estándar.

Con este procedimiento se obtuvieron las graficas mostradas en las figuras de la 6 a la 47 iniciando con el sitio EST, RM, RSC y PL4V presentando los cocientes espectrales de cada arreglo realizado en cada uno de los sitios.

SITIO EST.

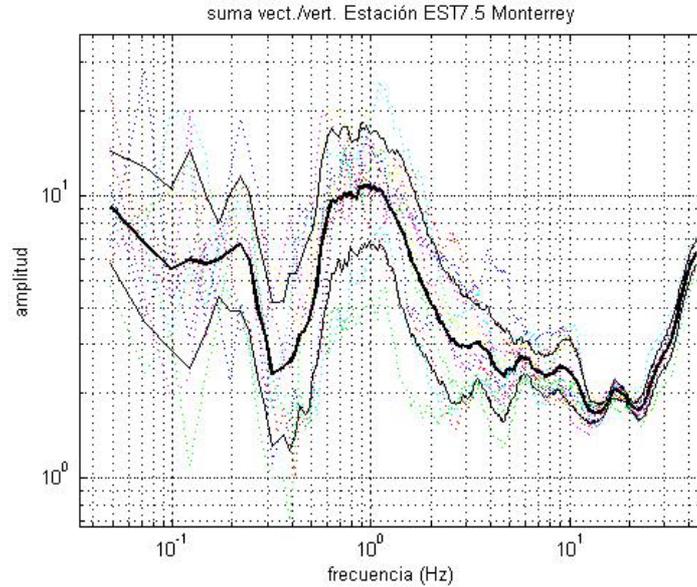


Figura 6. Cocientes espectrales H/V para la estación 1 del Estadio UANL abertura de 7.5 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

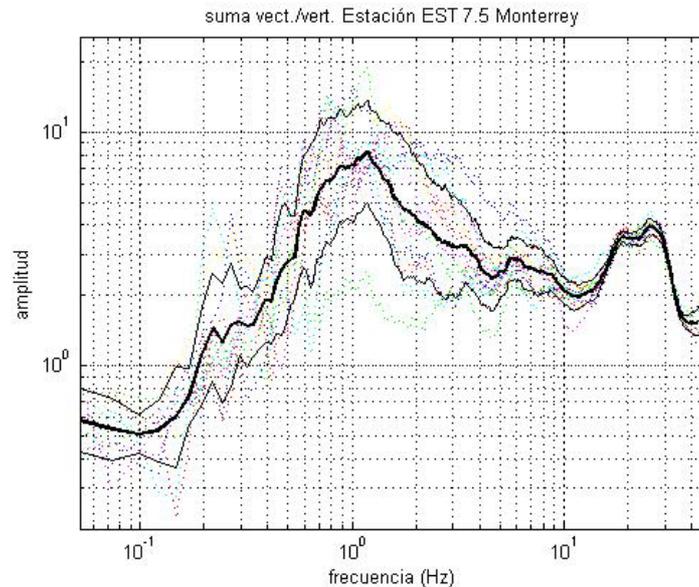


Figura 7. Cocientes espectrales H/V para la estación 2 del Estadio UANL abertura de 7.5 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

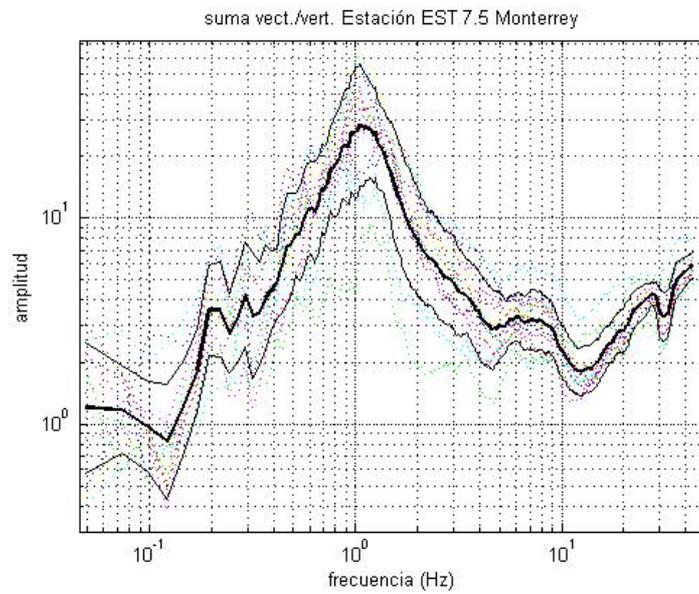


Figura 8. Cocientes espectrales H/V para la estación 3 del Estadio UANL abertura de 7.5 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

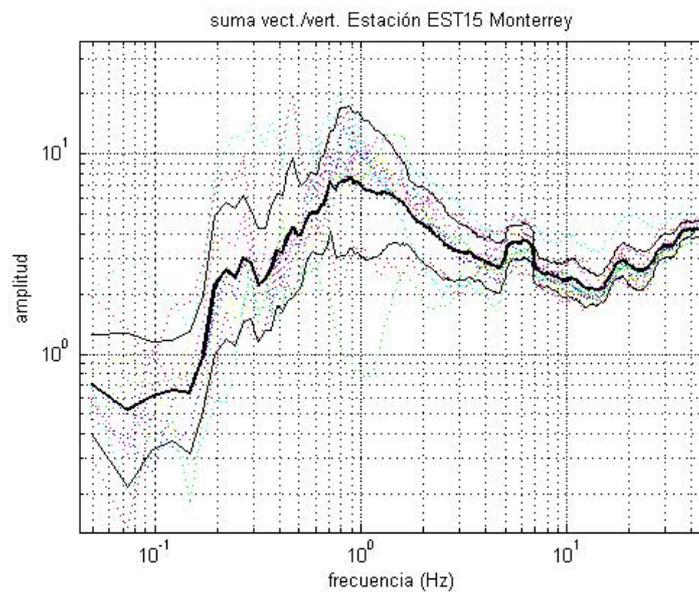


Figura 9. Cocientes espectrales H/V para la estación del Estadio UANL abertura de 15 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

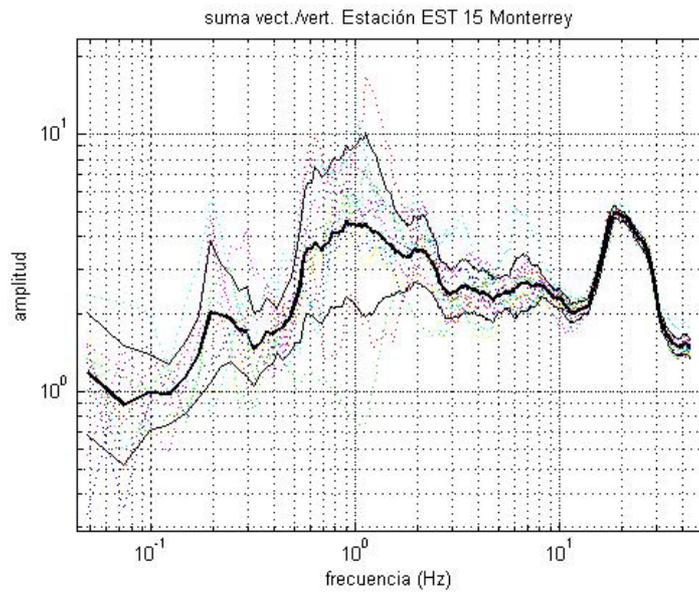


Figura 10. Cocientes espectrales H/V para la estación Estadio UANL abertura de 15 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

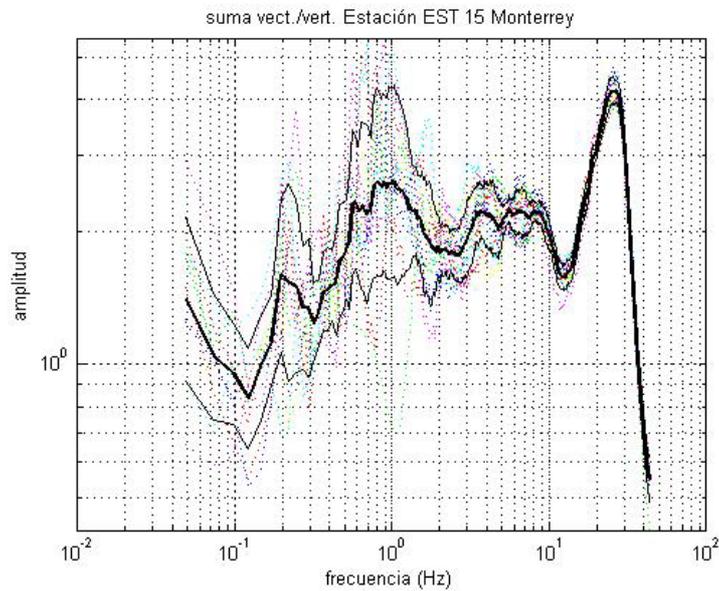


Figura 11. Cocientes espectrales H/V para la estación Estadio UANL abertura de 15 metros y para el vértice 3. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

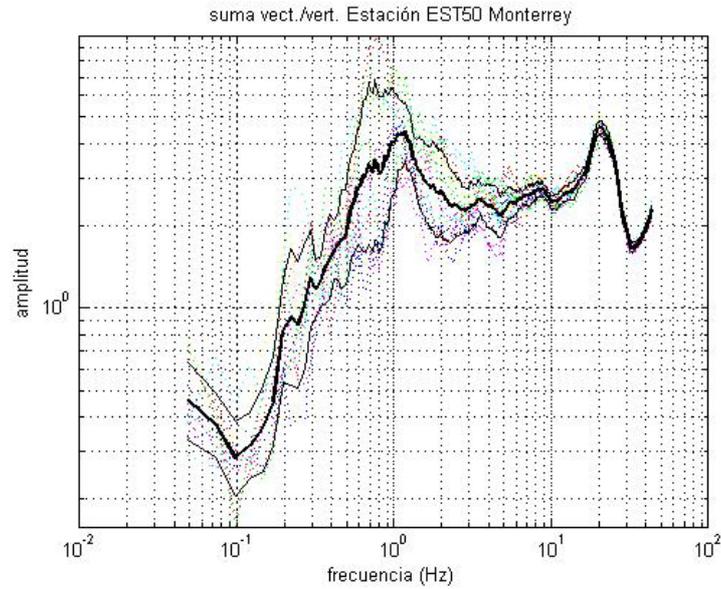


Figura 12. Cocientes espectrales H/V para la estación Estadio UANL abertura de 50 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

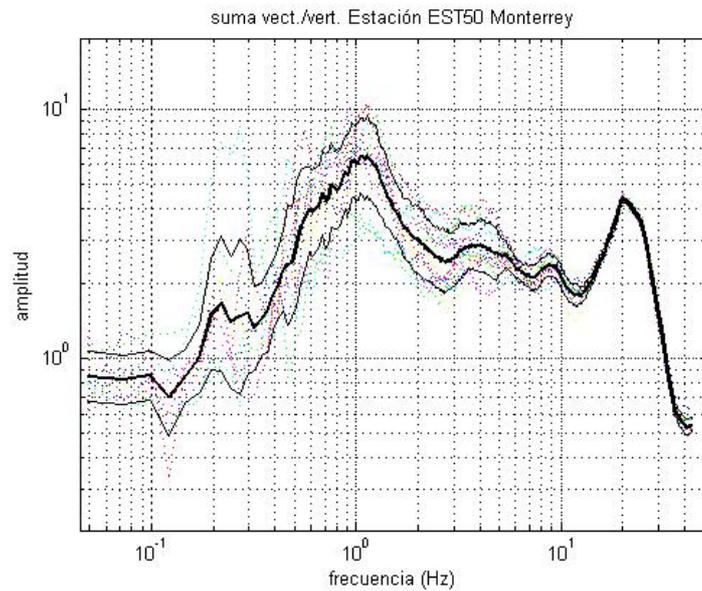


Figura 13. Cocientes espectrales H/V para la estación Estadio UANL abertura de 50 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

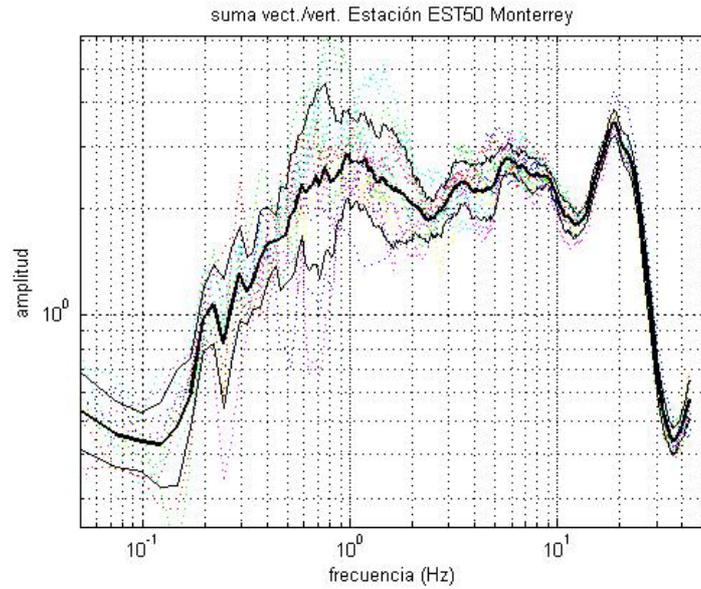


Figura 14. Cocientes espectrales H/V para la estación Estadio UANL abertura de 50 metros y para el vértice 3. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

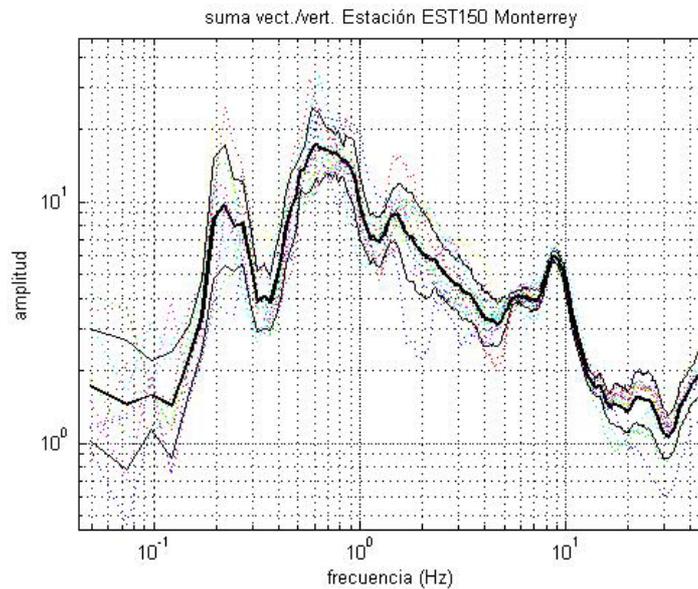


Figura 15. Cocientes espectrales H/V para la estación Estadio UANL abertura de 150 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

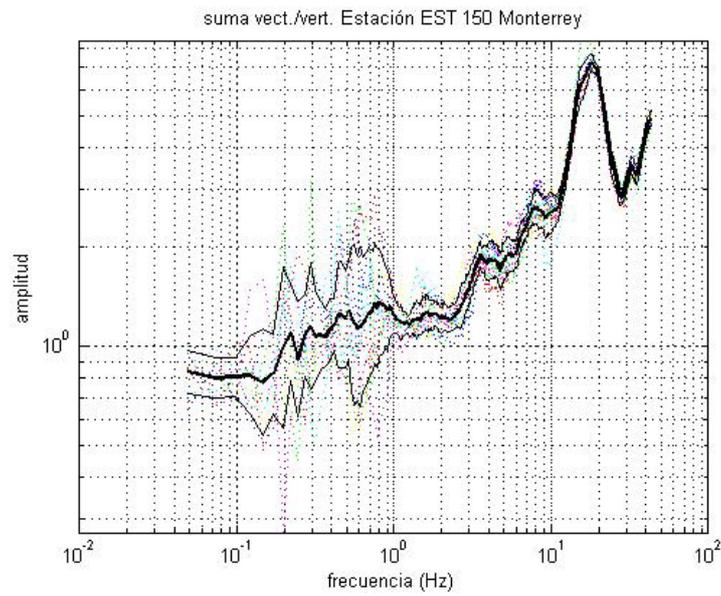


Figura 16. Cocientes espectrales H/V para la estación Estadio UANL abertura de 150 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

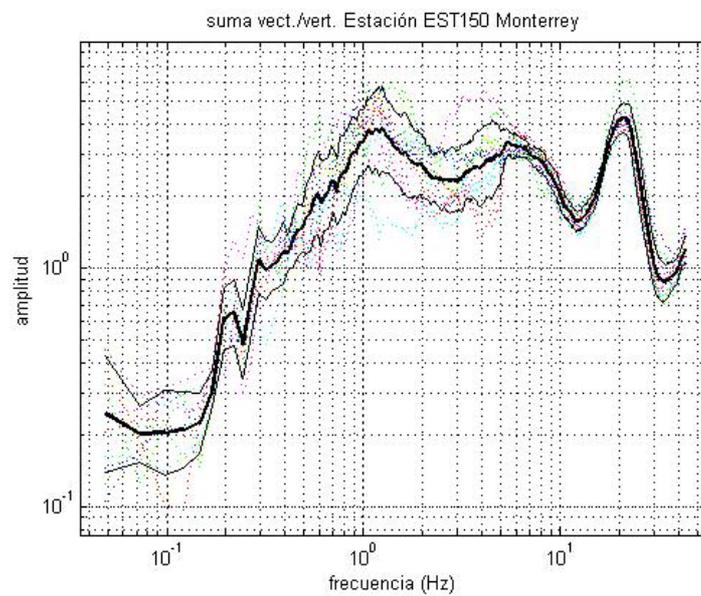


Figura 17. Cocientes espectrales H/V para la estación Estadio UANL abertura de 150 metros y para el vértice 3. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

SITIO RM.

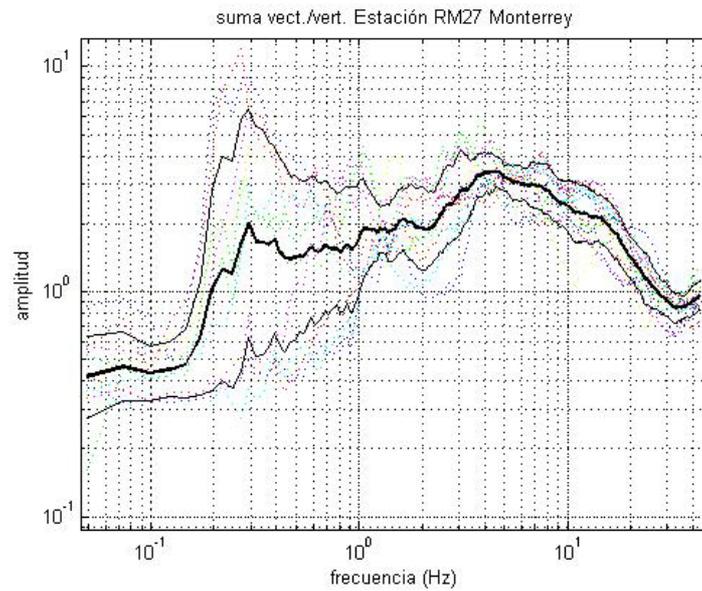


Figura 18. Cocientes espectrales H/V para el sitio ROMA, abertura de 27 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

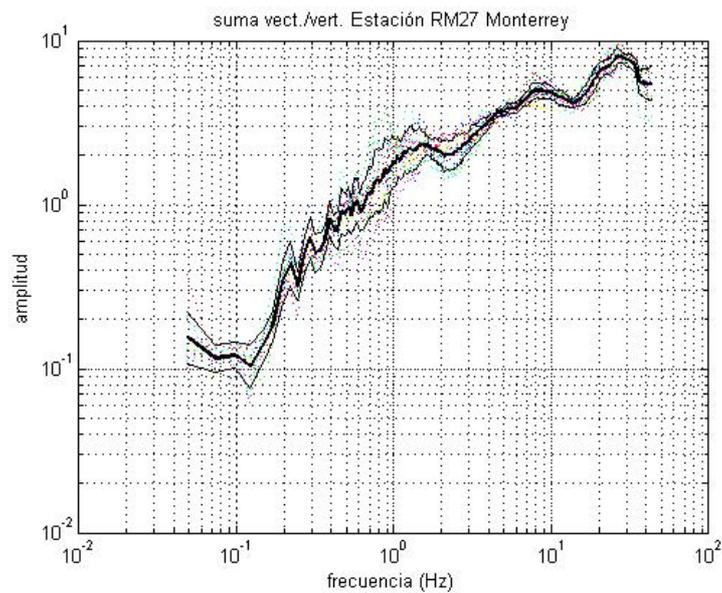


Figura 19. Cocientes espectrales H/V para el sitio ROMA, abertura de 27 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

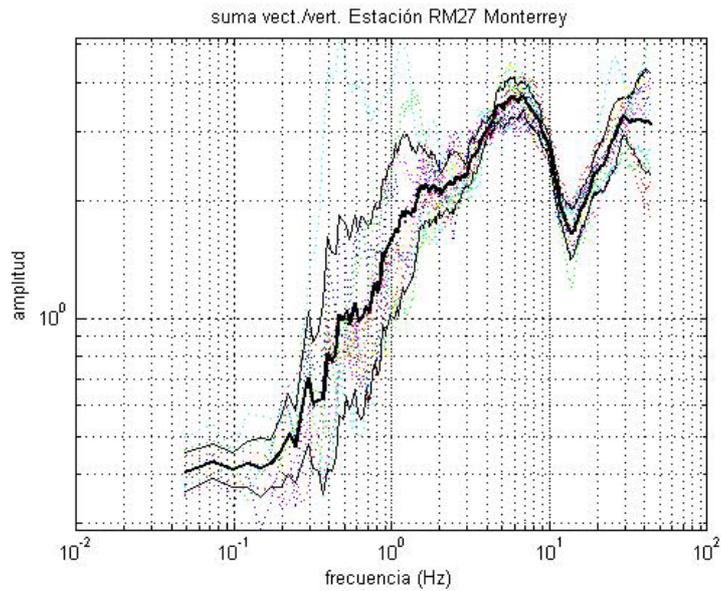


Figura 20. Cocientes espectrales H/V para el sitio ROMA, abertura de 27 metros y para el vértice 3. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

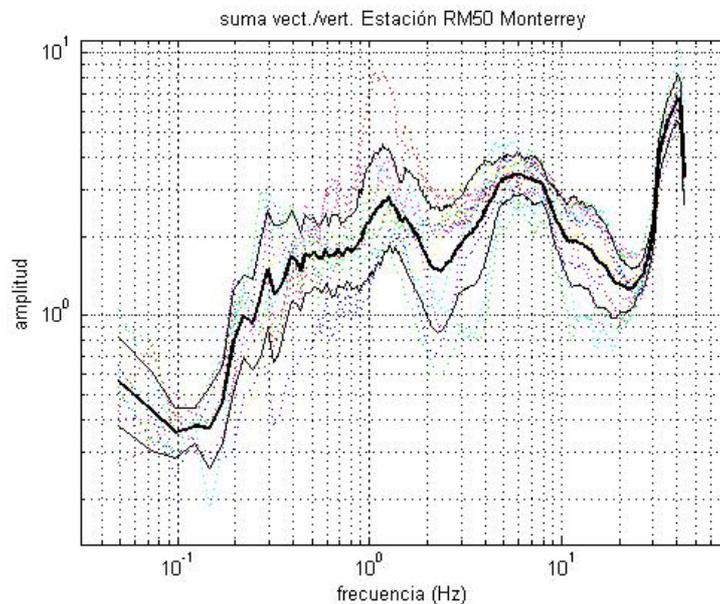


Figura 21. Cocientes espectrales H/V para el sitio ROMA, abertura de 50 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

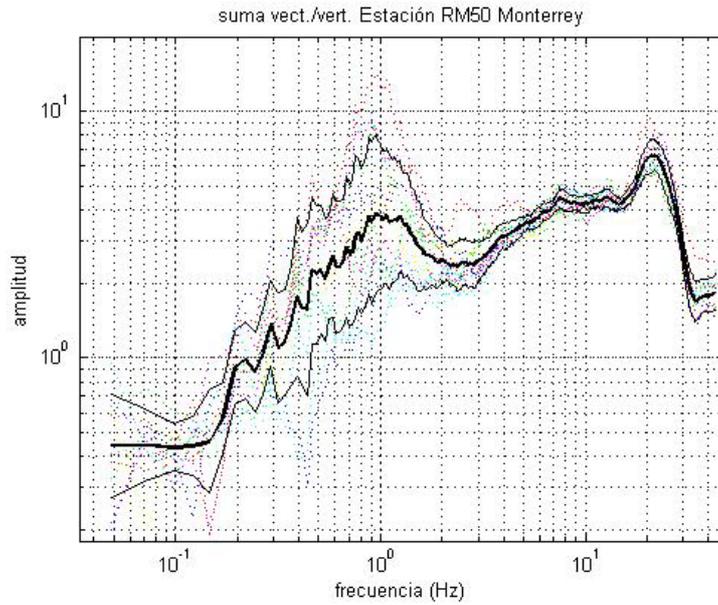


Figura 22. Cocientes espectrales H/V para el sitio ROMA, abertura de 50 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

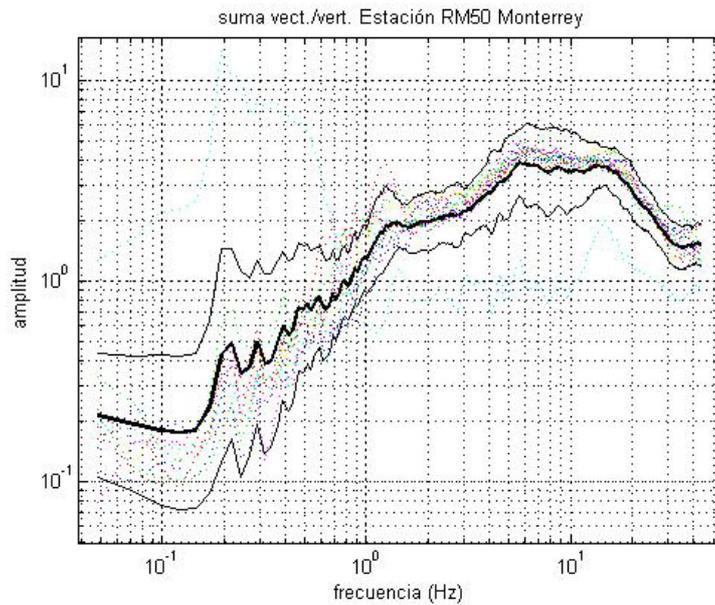


Figura 23. Cocientes espectrales H/V para el sitio ROMA, abertura de 50 metros y para el vértice 3. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

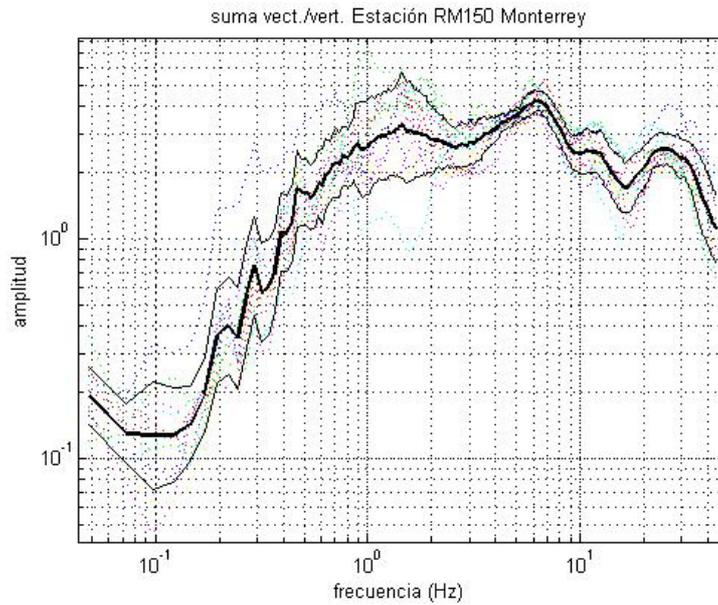


Figura 24. Cocientes espectrales H/V para el sitio ROMA, abertura de 150 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

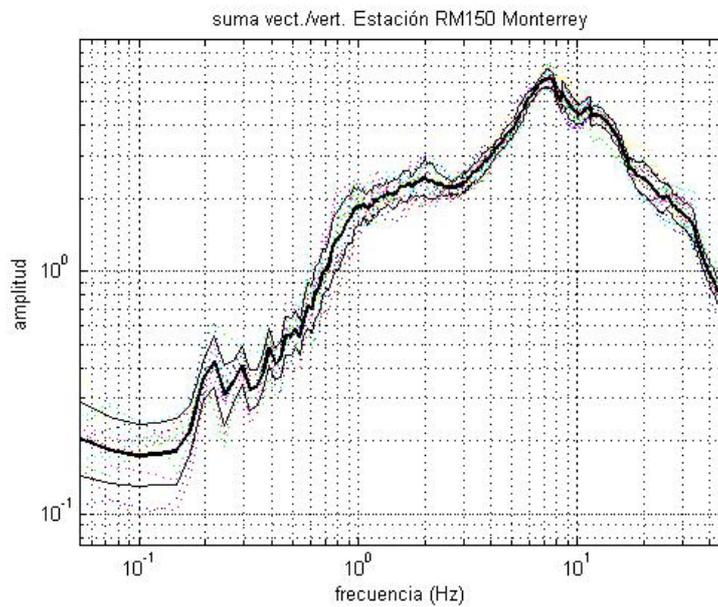


Figura 25. Cocientes espectrales H/V para el sitio ROMA abertura de 150 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

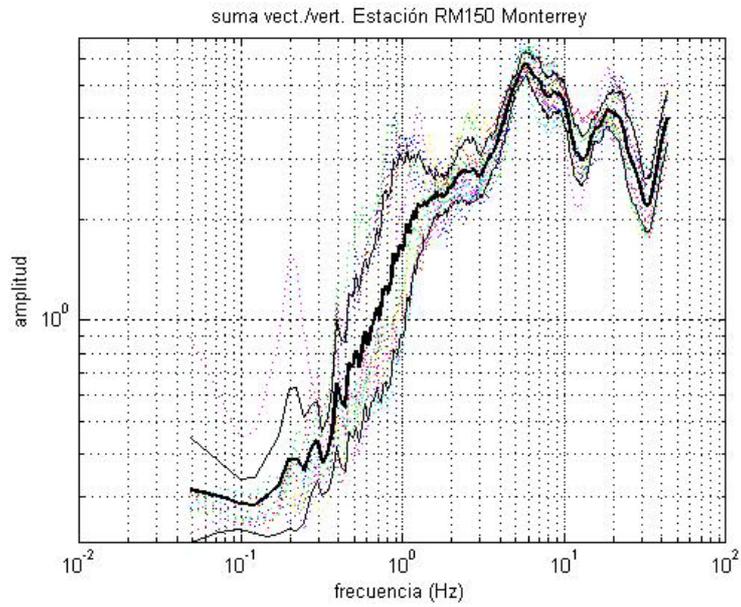


Figura 26. Cocientes espectrales H/V para el sitio ROMA, abertura de 150 metros y para el vértice 3. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

SITIO RSC

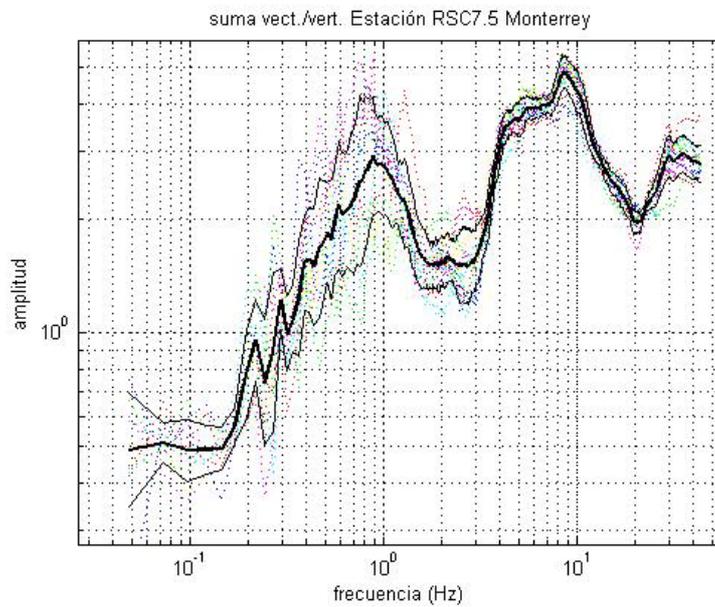


Figura 27. Cocientes espectrales H/V para el sitio Río Santa Catarina, abertura de 7.5 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

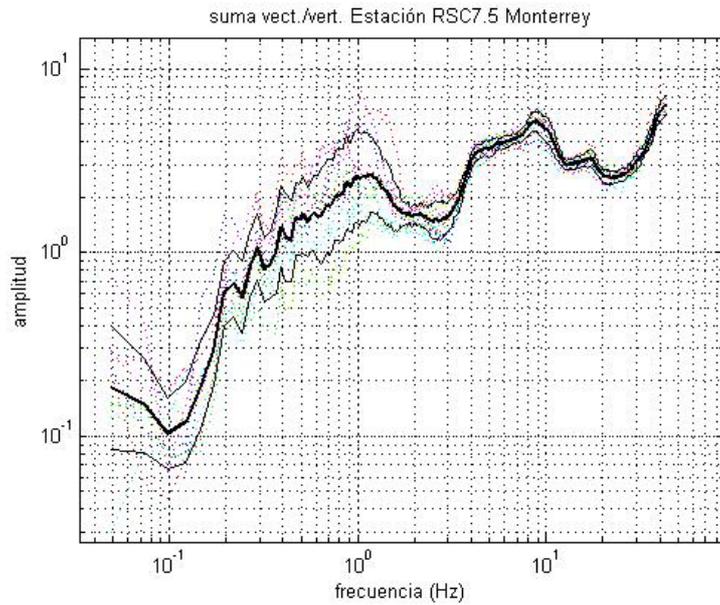


Figura 28. Cocientes espectrales H/V para el sitio Río Santa Catarina, abertura de 7.5 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

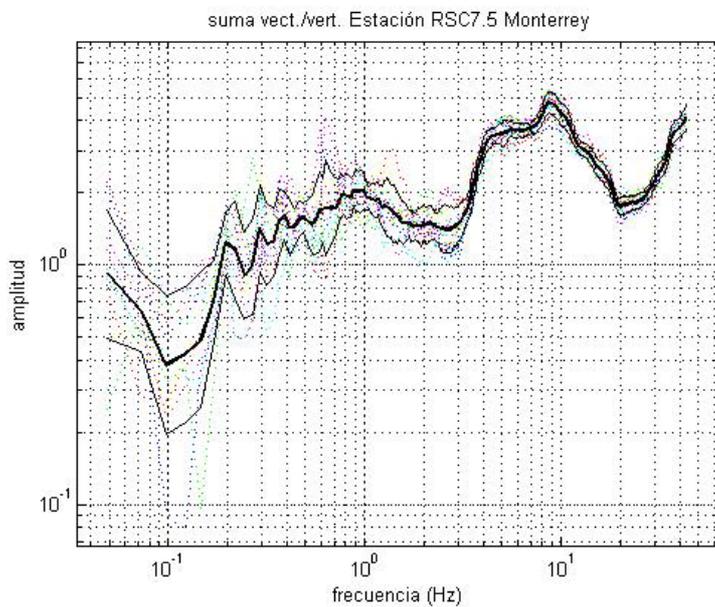


Figura 29. Cocientes espectrales H/V para el sitio Río Santa Catarina, abertura de 7.5 metros y para el vértice 3. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

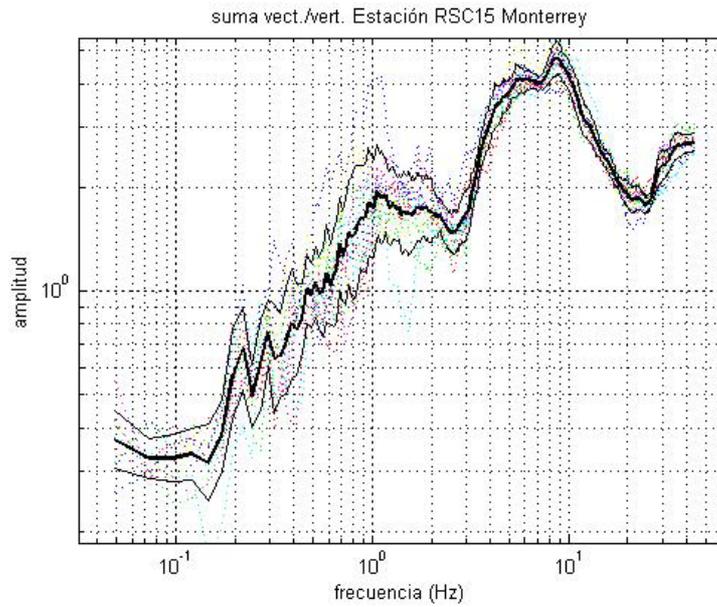


Figura 30. Cocientes espectrales H/V para el sitio Río Santa Catarina, abertura de 15 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

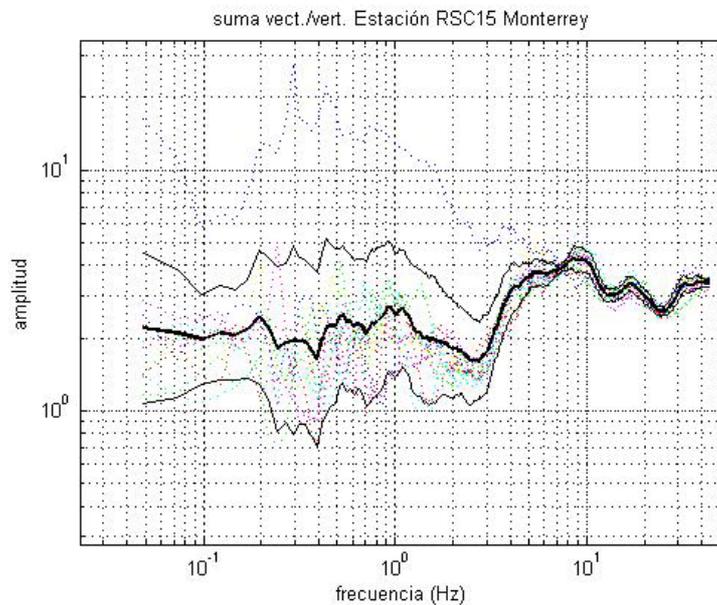


Figura 31. Cocientes espectrales H/V para el sitio Río Santa Catarina, abertura de 15 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

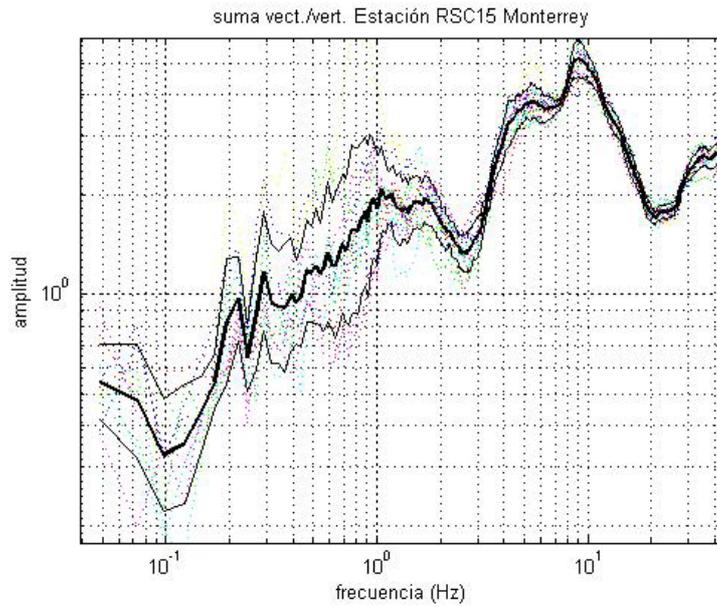


Figura 32. Cocientes espectrales H/V para el sitio Río Santa Catarina, abertura de 15 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

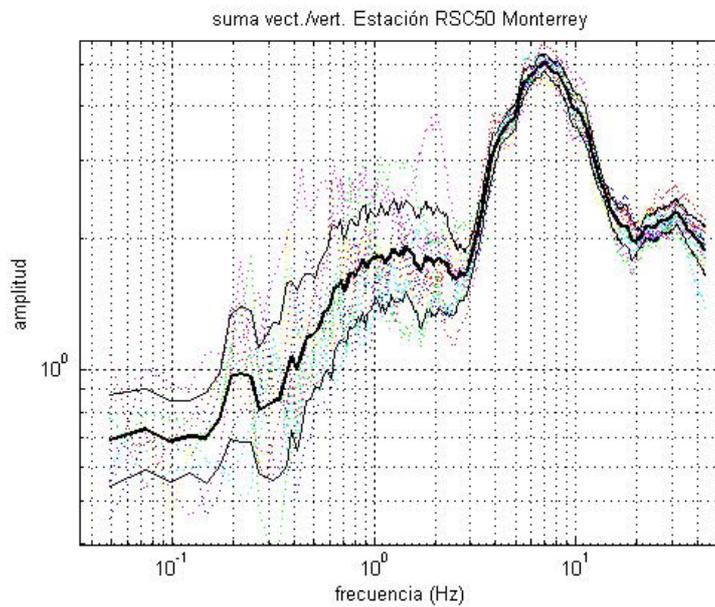


Figura 33Cocientes espectrales H/V para el sitio Río Santa Catarina, abertura de 50 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

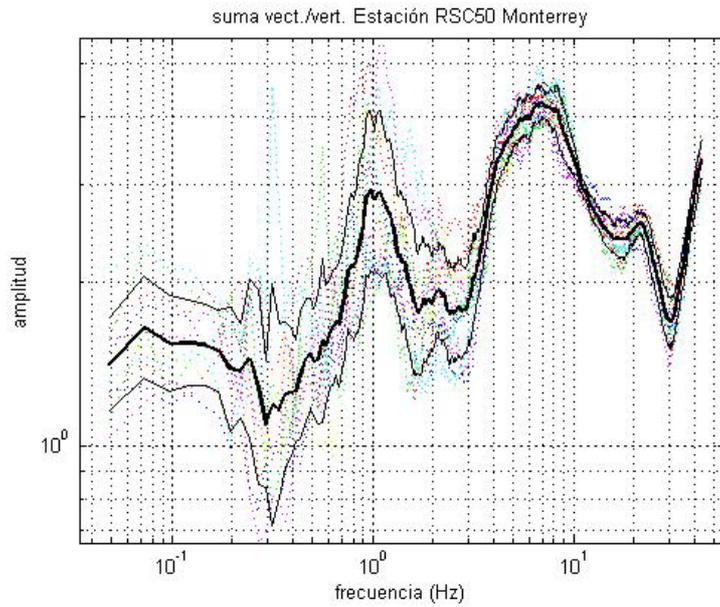


Figura 34 Cocientes espectrales H/V para el sitio Río Santa Catarina, abertura de 50 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

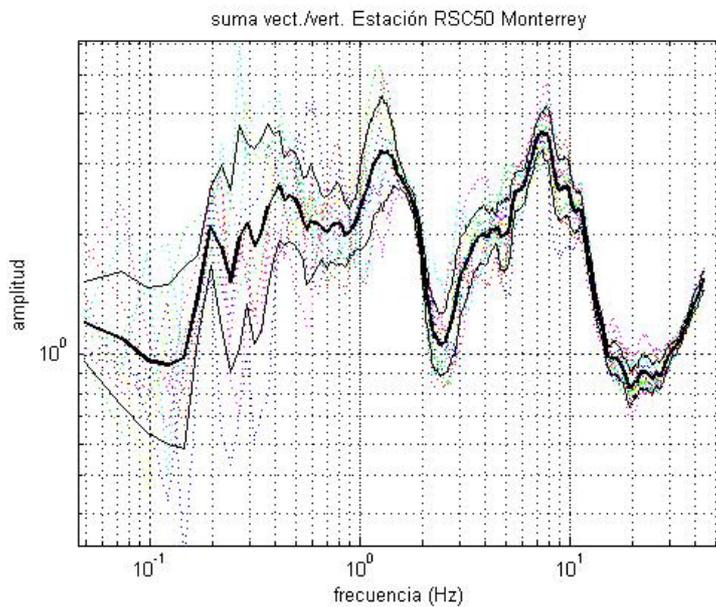


Figura 35. Cocientes espectrales H/V para el sitio Río Santa Catarina, abertura de 50 metros y para el vértice 3. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

SITIO PL4V

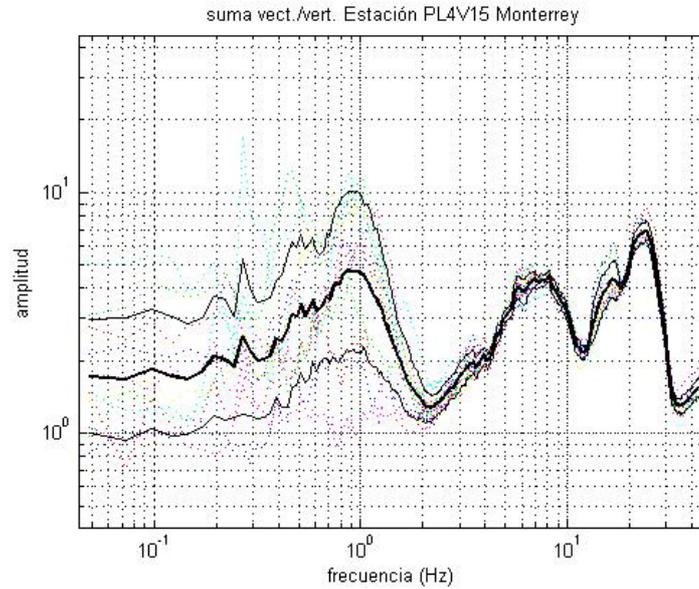


Figura 36. Cocientes espectrales H/V para el sitio Centro (predio los 4 vientos), abertura de 15 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

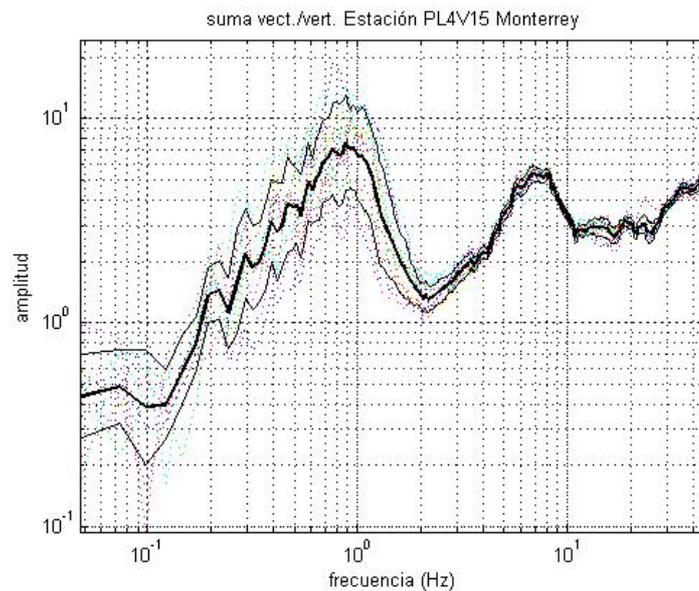


Figura 37 Cocientes espectrales H/V para el sitio Centro (predio los 4 vientos), abertura de 15 metros y para el vértice 2 En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

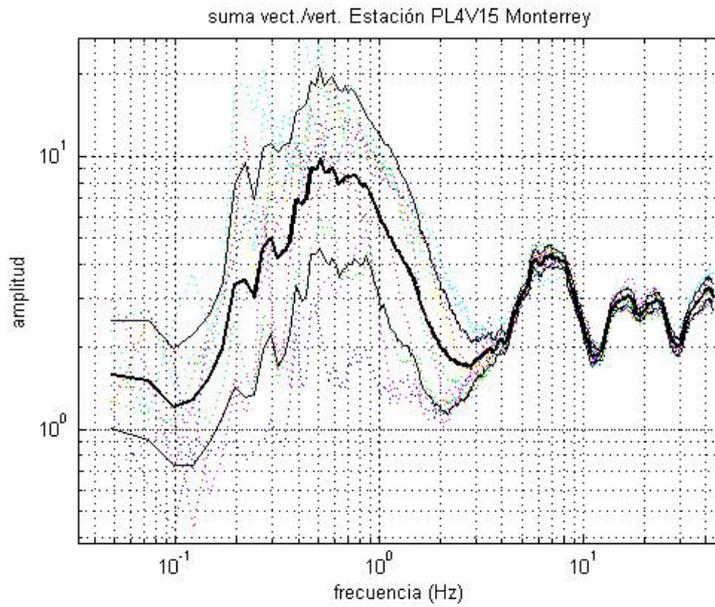


Figura 38 Cocientes espectrales H/V para el sitio Centro (predio los 4 vientos), abertura de 15 metros y para el vértice 3. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

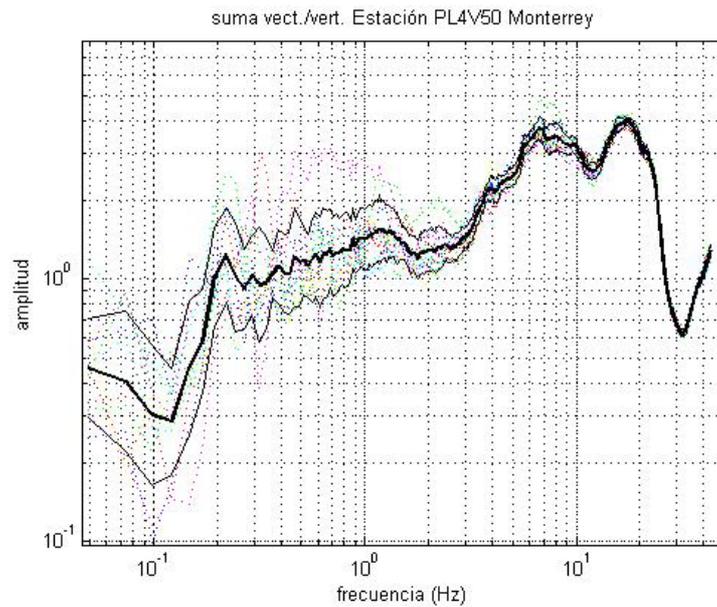


Figura 39. Cocientes espectrales H/V para el sitio Centro (predio los 4 vientos), abertura de 50 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

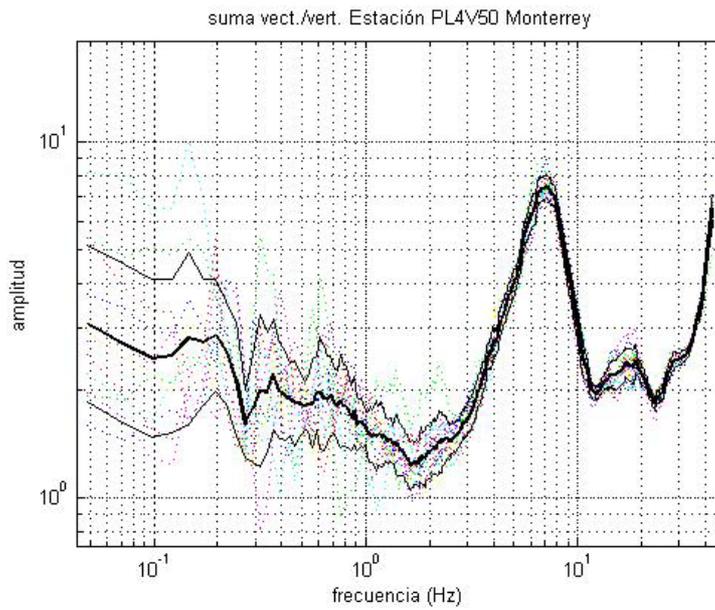


Figura 40. Cocientes espectrales H/V para el sitio Centro (predio los 4 vientos), abertura de 50 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

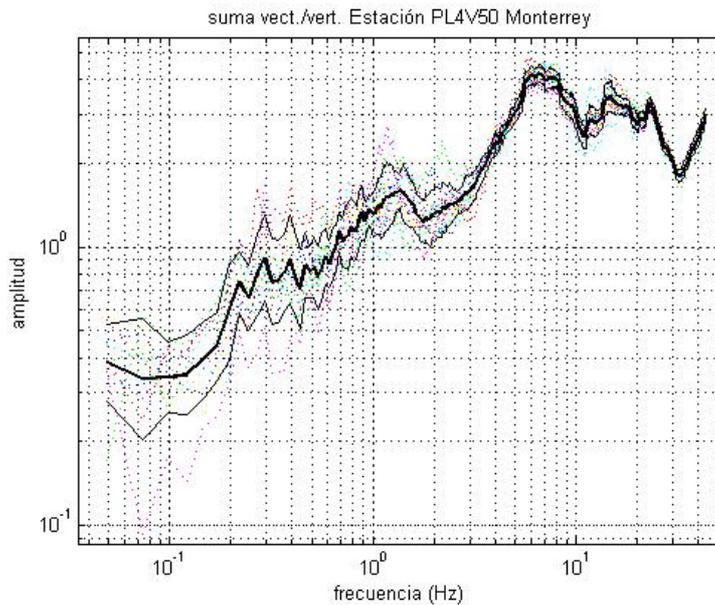


Figura 41. Cocientes espectrales H/V para el sitio Centro (predio los 4 vientos), abertura de 50 metros y para el vértice 3. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

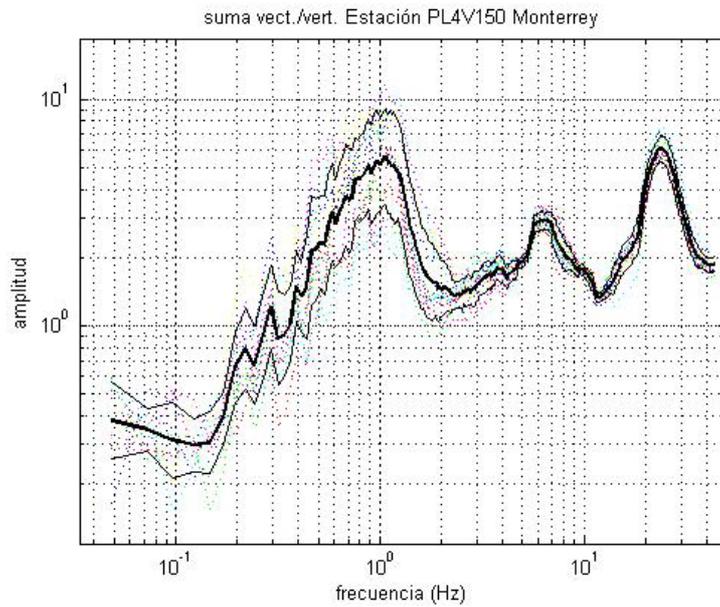


Figura 42. Cocientes espectrales H/V para el sitio Centro (predio los 4 vientos), abertura de 150 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

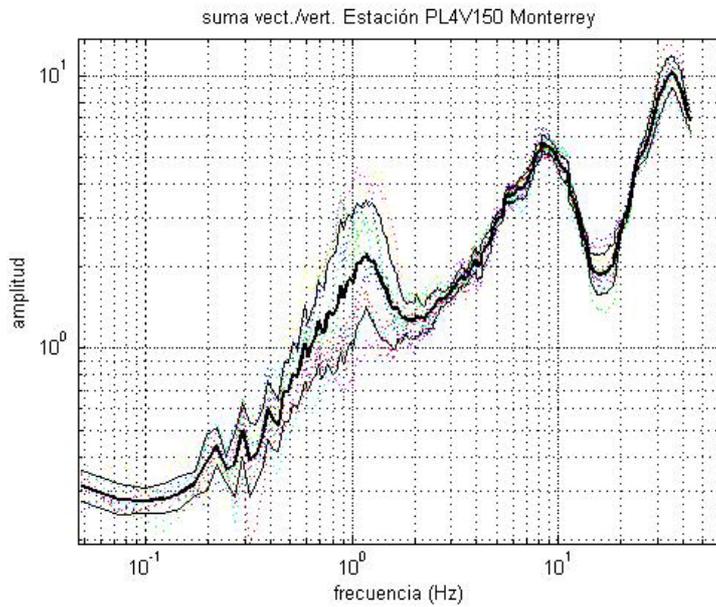


Figura 43. Cocientes espectrales H/V para el sitio Centro (predio los 4 vientos), abertura de 150 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

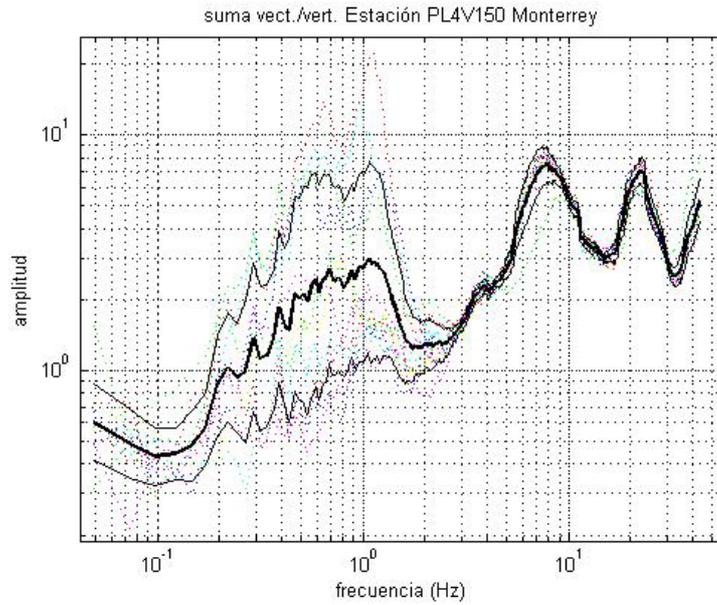


Figura 44. Cocientes espectrales H/V para el sitio Centro (predio los 4 vientos), abertura de 150 metros y para el vértice 3. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

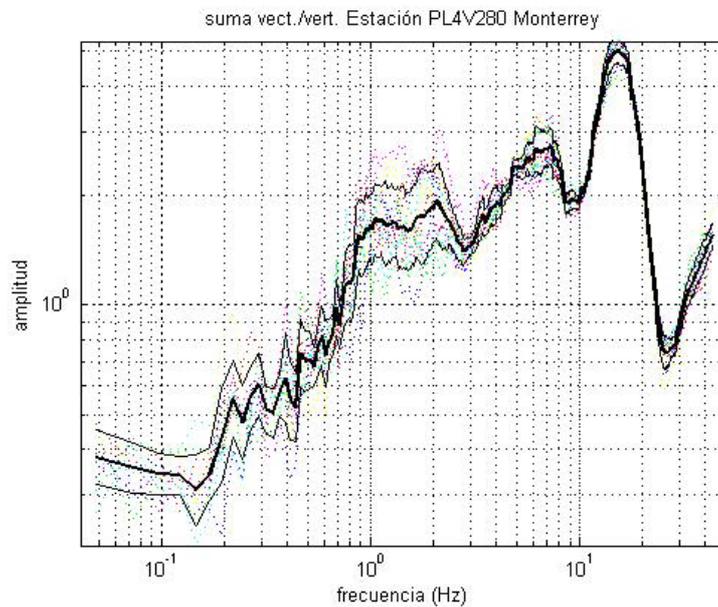


Figura 45. Cocientes espectrales H/V para el sitio Centro (predio los 4 vientos), abertura de 280 metros y para el vértice 1. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

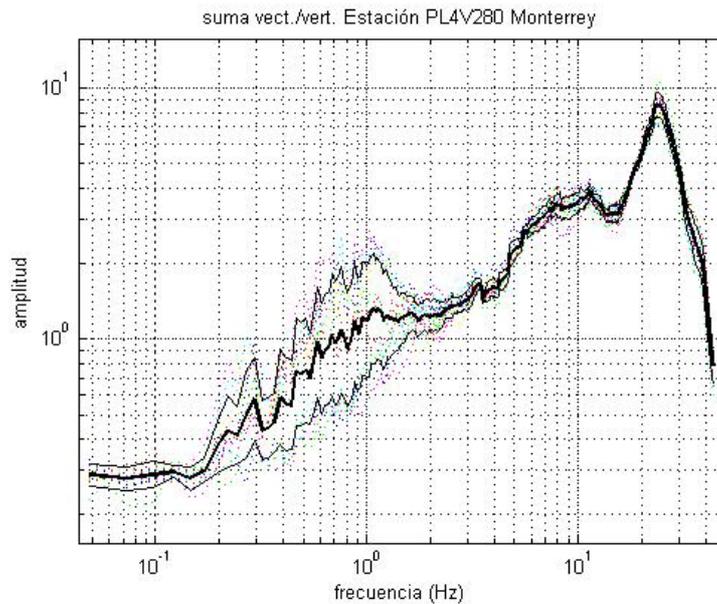


Figura 46. Cocientes espectrales H/V para el sitio Centro (predio los 4 vientos), abertura de 280 metros y para el vértice 2. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

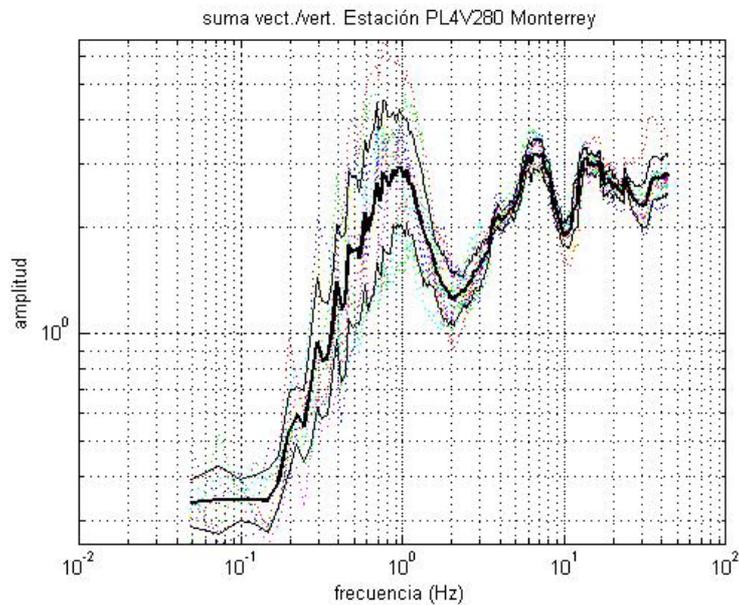


Figura 47. Cocientes espectrales H/V para la el sitio Centro (predio los 4 vientos), abertura de 280 metros y para el vértice 3. En línea gruesa esta el promedio, la desviación estándar logarítmica aparece en líneas continuas y en líneas punteadas la desviación estándar de cada ventana.

Tabla 5. Frecuencias y periodos dominantes encontrados para los arreglos del estacionamiento del estadio de futbol de la Universidad Autónoma de Nuevo León

Vértice	7.5 m (f)	7.5 m (To)	15 m (f)	15 m (To)	50 m (f)	50 m (To)	150 m (f)	150 m (To)
I	0.85	1.18	0.85	1.18	1.2	0.83	0.6	1.67
II	1.2	0.83	0.9	1.11	1.2	0.83	0.8	1.25
III	1.0	1.0	1.0	1.0	0.95	1.05	1.2	0.83

Tabla 6. Frecuencias y periodos dominantes encontrados para los arreglos Roma.

Vértice	27 m (f)	27 m (To)	50 m (f)	50 m (To)	150 m (f)	150 m (To)
I	4.5	0.22	6.5	0.15	6.5	0.15
II	8.0	0.13	0.95	1.05	7.5	0.13
III	7.5	0.13	5.5	0.18	5.5	0.18

Tabla 7. Frecuencias y periodos dominantes encontrados para los arreglos en el lecho del Río Santa Catarina

Vértice	7.5 m (f)	7.5 m (To)	15 m (f)	15 m (To)	50 m (f)	50 m (To)
I	8.5/0.9	0.12/1.11	8.5/1.0	0.12/1.00	7.0/1.44	0.14/0.69
II	9.0/1.2	0.11/0.83	9.0/-	0.11/-	6.5/0.95	0.15/1.05
III	9.0/-	0.11/-	9.0/1.0	0.11/1.00	7.5/1.2	0.13/0.83

Tabla 8. Frecuencias y periodos dominantes encontrados para los arreglos del Centro, Predio los cuatro vientos.

Vértice	15 m (f)	15 m (To)	50 m (f)	50 m (To)	150 m (f)	150 m (To)	280 m (f)	280 m (To)
I	8.0/1.0	0.13/1.00	7.0/-	0.14/-	6.5/1.0	0.15/1.0	7.0/2.0	0.14/0.50
II	7.0/0.9	0.14/1.11	7.0/-	0.14/-	8.5/1.2	0.12/0.83	11.0/-	0.09/-
III	7.0/0.5	0.14/2.0	7.0/-	0.14/-	7.5/1.1	0.13/0.91	6.5/0.9	0.15/1.11

En las Tablas de la 5 a la 8 se muestran los resultados de las frecuencias dominantes y su conversión a periodos. Como se puede apreciar en los cocientes tanto de los arreglos observados junto al lecho del Río Santa Catarina así como los observados en el sitio que hemos llamado el Centro en la localidad denominada los cuatro vientos, estos presentan dos picos muy notorios por lo que en vez de considerar únicamente una frecuencia dominante se consideran por el momento los dos picos.

Prámos decir en resumen que para el estacionamiento de la UANL se tiene 1.06 segundos de periodo dominante en promedio, con variaciones entre 0.83 y 1.67 segundos. Para las mediciones realizadas en Roma, el promedio es de 0.26 segundos. En este caso si omitimos la lectura del vértice 2 en la abertura de 50 metros, que resultó

anómala con respecto a las demás, el promedio es de 0.16 segundos, con variaciones entre 0.13 y 0.22. Las mediciones realizadas en los arreglos del lecho del Río Santa Catarina tienen un promedio de 0.12 segundos para uno de los periodos predominantes observados y 0.93 segundos para el otro, con rangos de 0.11 a 0.15 segundos y de 0.69 a 1.11 segundos, respectivamente. Note que no en todos los cocientes se observaron dos picos por lo que en lugares en donde no se uno de los dos picos no se considero para calcular el promedio. Finalmente para el predio de los cuatro vientos los promedios fueron de 0.13 y 1.06 segundos, cada uno de ellos con variaciones entre 0.09 y 0.15 segundos y 0.5 y 2.0 segundos respectivamente.

Referencias

Servicios de consulta en línea : [//www.googleearth.com](http://www.googleearth.com).

Nakamura, Y., (1989), "A method for dynamic characteristics estimation of surface using microtremor on the ground surface. *QR of R.T. r.*, 30-1.

Singh S. K., M. Rodriguez y L. Esteva (1983), "Statistics of Small Earthquakes and frequency of Occurrence of large Earthquakes Along the Mexican Subduction Zone". *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73 No.6, pp 1779-1796.

Vazquez Rosas R,(2002), "Propuesta de microzonificación sísmica para la ciudad de Uruapan Michoacán". *Tesis de licenciatura ., Facultad de Ingeniería UMSNH Morelia Mich. Noviembre 2002*

Vazquez Rosas R,(2002), "Propuesta de microzonificación sísmica para la ciudad de Zamora Michoacán". *Memorias del XV congreso de Ingeniería sísmica SMIS, México 2005. part .III-02*



*Ricardo Vázquez Rosas, Jorge Aguirre González, Horacio Mijares A. ⁽¹⁾,
Víctor H. Garduño Monroy y Eleazar Arreygue Rocha ⁽²⁾*

Artículo II-08**RESUMEN**

En este trabajo se elabora una propuesta de un mapa de curvas de isoperiodos de la ciudad de Uruapan. Fue obtenido mediante el análisis de vibración ambiental (microtremores) registrados en 54 sitios, 3 estaciones semi-permanentes que registraron eventos sísmicos, así como también la información geotécnica, geológica y topográfica existente. Con los cocientes espectrales (H/V) de los microtremores observados se pudieron obtener las frecuencias pico usando el método de Nakamura. En general las frecuencias pico se localizaron alrededor de $f = 4.8$ Hz teniendo periodos máximos de alrededor de $T = 0.6$ s. y mínimos de $T = 0.10$ s.

ABSTRACT

In this work a proposal for the isoperiods map of Uruapan city is elaborated. It was obtained by the analysis of the environmental vibration (microtremors) recorded in 54 places, 3 semi-permanent stations that recorded seismic events, as well as the existent geotechnical, geological and topographical information. With the spectral ratio (H/V) of the observed microtremors the pick frequencies could be obtained by the Nakamura's method. In general the pick frequencies were located around $f = 4.8$ Hz having maximum periods of around $T = 0.6$ s. and minima of $T = 0.10$ s.

INTRODUCCION

La ciudad de Uruapan Michoacán se localiza al oeste del estado de Michoacán ($19^{\circ}25'00''$; $102^{\circ}04'00''$) a una altura de 1,600 metros sobre el nivel del mar. Su superficie es de 830.28 kilómetros cuadrados y representa el 1.39 por ciento del total del estado. Es una de las mas importantes dentro de nuestro estado ya que ha tenido un gran desarrollo en cuanto a población y vivienda.

El Estado de Michoacán forma parte de una de las zonas con mas alta sismicidad de nuestro país, donde se han generado sismos históricos de más de 8.0 grados de magnitud (Jara y Sánchez, 2001) por lo que se realizó una recopilación histórica desde 1882 y 1943.

En el estado, se tienen tres fuentes potenciales de generación de sismos:

-
- (1) Coordinación de Ingeniería Sismológica, Instituto de Ingeniería, UNAM. Ciudad Universitaria. Apdo. postal 70-472, Coyoacán, 04510 México DF. RvazquezR@iingen.unam.mx , joagg@pumas.iingen.unam.mx
 - (2) Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, UMSNH. Ciudad Universitaria, edificio U, Morelia Michoacán. vgmonroy@zeus.unimich.mx , arrocha@zeus.unimich.mx

Los generados por la actividad Volcánica (como los sismos que se produjeron en las erupciones de los volcanes Jorullo en 1759 y Parícutín en 1943).

Los generados por la Tectónica.

- Subducción : sismos producidos por al Placa de Cocos, estos sismos ocurren a profundidades de entre 10 y 30 Km. aproximadamente como ejemplo podemos mencionar los sismos de, 1979 (M 7.4) y 1985 (8.1).

- Intraplaca (rompimiento de litósfera oceánica subducida) : son producto de la subducción pero con epicentro dentro de la placa oceánica bajo el continente. Son sismos poco frecuentes y a mayores profundidades (alrededor de 60 Km.) donde la placa comienza a fundirse, pero que pueden causar grandes daños.

- Fallas Locales (intraplaca dentro de la placa continental). Puesto que los sismos producto de las fallas locales son focos superficiales, esto provoca que la energía liberada, producto de un evento de este tipo incida casi directamente (por ejemplo Falla de Acambay 1912, M =7.0)

Y eventualmente los artificiales (por ejemplo construcción de presas).

Por lo cual es importante tener conocimiento de como se va a comportar el suelo ante un evento sísmico, ya que en la actualidad no se conocen los parámetros de seguridad de riesgo sísmico de cada ciudad, por lo que, los reglamentos de construcción se basan en el establecido para la ciudad de México.

GEOLOGÍA REGIONAL

La ciudad se desarrolla en una Zona de acumulación que forma parte de la cuenca del río Cupatitzio. Esta depresión genera que depósitos provenientes de los volcanes monogenéticos rellenen a esta depresión, donde de esta manera se reconocen de la base a la cima de esta ciudad, (ver fig.1). La ciudad de Uruapan se localiza en un límite sur del Cinturón Volcánico Mexicano, en una depresión que fue ocupada por el vulcanismo monogenético del corredor tarasco, este esta descansando sobre rocas graníticas que afloran a pocos kilómetros al sur de la ciudad. (ver fig. 1).

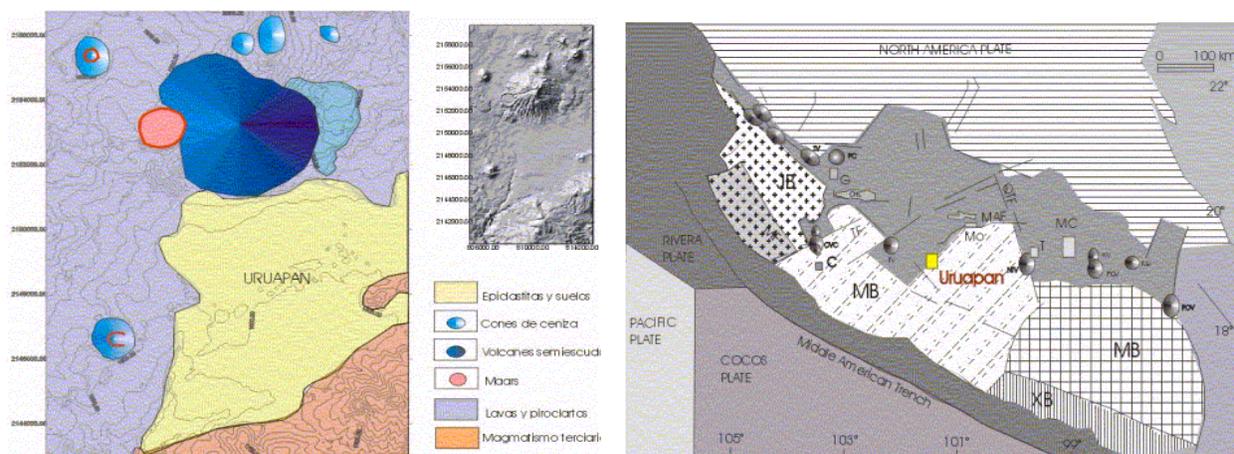


Figura 1. Geología de la ciudad de Uruapan (izquierda) y ambiente tectónico regional .

REVISIÓN HISTÓRICA DE LA SISMICIDAD DE URUAPAN (1858 – 1943)

En este párrafo se describen algunos datos históricos de eventos sísmicos que se han sentido en la ciudad de Uruapan (García y Suárez ,1996).

19 de junio de 1858, Uruapan, Terremoto espantoso, 9:05 am. Donde el sacudimiento causó fuertes daños de templos y casas y varias desgracias personales.

19 de Julio de 1882. Uruapan, Temblor de Trepidación. De (...) 1 a 2:25 pm.

9 de Febrero de 1886. Uruapan, Temblor de Oscilación de Sur a Norte. De 3:30 am, fuerte sacudimiento, por espacio de 2 segundos. Después se repitió media hora.

12 de Noviembre de 1891. Uruapan, Fuerte Temblor Oscilatorio de SE a NE. de 10: 11 am. Con duración de 3 segundos.

16 de Marzo de 1895. Uruapan, 2 Temblores uno de Trepidación y otro Oscilatorio con intervalos de segundos.

5 de Abril de 1895, (...) Fuerte temblor oscilatorio S a N. entre 2: 30 y 3.00 am. con duración de 3 y 4 segundos que repitió como a los 5 segundos.

18 de Enero de 1906, Uruapan, Temblor Trepidatorio, de 12:15 pm. con una duración de 5 segundos y prolongados ruidos subterráneos.

20 de Agosto 1906, Uruapan, Temblor Oscilatorio y Trepidatorio dirección NO a SE, a las 11:54 pm. con duración de 25 segundos.

14 de Abril de 1907, Uruapan ,Temblor Oscilatorio de NS, a las 00:35 am.

12 de Mayo de 1910, Uruapan , Temblor Oscilatorio NO-SE duración de 55 segundos.

7 de Junio de 1911, Uruapan , Temblor Oscilatorio NS con una duración de 2 minutos y M=4 causó varios desperfectos en algunos edificios.

31 de Enero de 1912, Uruapan Temblor Oscilatorio, con una duración de 8 segundos.

14 de Febrero de 1943, sentidos ligeros en Uruapan (...).

23 de Marzo de 1943 , Uruapan Temblor Oscilatorio sentido fuerte.

ANTECEDENTES LOCALES DE URUAPAN MICHOACÁN

Localización: Se localiza al Oeste del estado a una altura de 1,600 m sobre el nivel del mar. Su superficie es de 830.28 Km² y representa el 1.39% de total del estado.

Su Población y Vivienda.

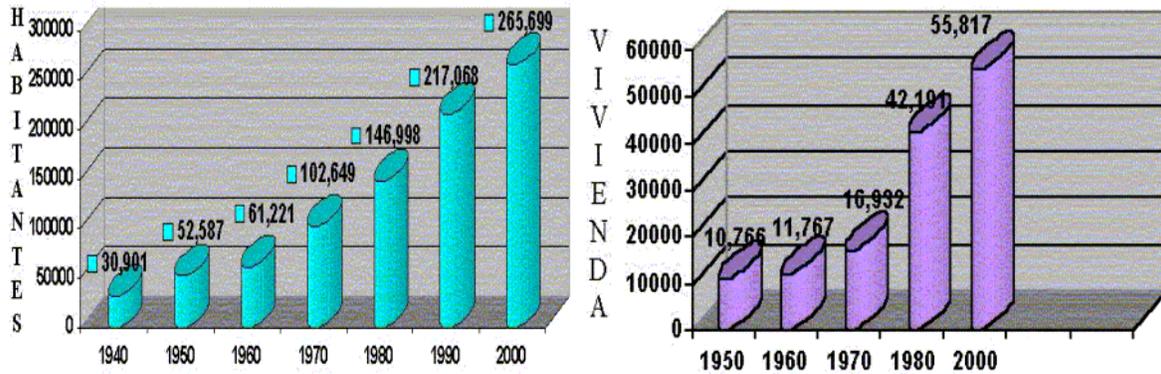


Figura 2. Crecimiento de población y crecimiento de vivienda (INEGI,2001).

La ciudad de Uruapan es una de las ciudades mas importantes del estado de Michoacán, ya que ha tenido un gran crecimiento en cuanto a población y vivienda. Como podemos observar en la fig. 2 es muy clara la diferencia de población entre 1980 y 2000 que es de 119000 habitantes y equivale a un crecimiento poblacional del 80.95 % en 20 años. Mientras que en vivienda se tiene registrada del año 1970 al 2000, una diferencia de 38,885 viviendas que representaría el 229.65 % de crecimiento de vivienda en 30 años.

MÉTODO DE NAKAMURA

Nakamura(1989) propuso un método para estimar lo que en su trabajo llamo “características dinámicas del suelo” a partir de registros de microtemores, argumentando su economía y la fácil adquisición. A partir de entonces este método se convirtió en uno de los mas utilizados a nivel mundial.

Siguiendo la metodología utilizada por Nakamura (1989), la función de transferencia de las capas superficiales se puede definir como el cociente:

$$ST = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (1)$$

donde: S_{HS} : es el componente horizontal del tremor en la superficie.

S_{HB} : es el componente horizontal del tremor en el substrato.

Se asume que el componente vertical del tremor refleja el efecto de las fuentes locales, que no es amplificado por las capas superficiales, y que el efecto de las ondas Rayleigh (E_s) puede ser estimado por el cociente:

$$E_s = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (2)$$

donde: S_{VS} : es el componente vertical del tremor en la superficie,

S_{VB} : es el componente vertical del tremor en el substrato.

Si $E_s = 1$, no existe contribución de ondas Rayleigh; y si E_s es mayor que 1, el efecto de las ondas Rayleigh también es mayor.

Por lo que es una función de transferencia del sitio sin efecto de las ondas de Rayleigh, estaría dada por el cociente .

$$S_{TT} = \left(\frac{S_{HS}}{S_{VS}} \right) / \left(\frac{S_{HB}}{S_{VB}} \right) = \frac{R_s}{R_B} \quad (3)$$

Nakamura (1989) calcula el cociente R_B en dos estaciones que cuentan con datos de pozos y afirma que es $\cong 1$, por lo que define la función de transferencia del sitio $S_{TT} \cong R_s$.

$$S_{TT} \cong \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (4)$$

APLICACIÓN DEL METODO DE NAKAMURA

Este método se aplicó con el fin de encontrar la frecuencia fundamental del suelo en la ciudad de Uruapan. Con el fin de obtener mejores resultados, se probaron distintas posibilidades para considerar los datos y los cocientes espectrales, y se comparan de una manera estadística los resultados. También se analizaron las ventanas de registro de 30 minutos para obtener una mejor definición de los cocientes espectrales hacia bajas frecuencias.

Se realizaron mediciones de vibración ambiental en 54 sitios de la ciudad de Uruapan Michoacán (fig. 3) con el propósito de obtener el periodo de vibración del suelo. También se dejaron grabando dos estaciones fijas, que estuvieron registrando durante un mes, una en roca y otra en suelo blando. Con esta información se trazaron las curvas de isoperiodos.

Los equipos que se utilizaron para medir la vibración ambiental fueron sensores de banda ancha GURALP de 3 canales conectados a digitalizadores REFTEK que cuentan con una antena de GPS. En las estaciones fijas se instalaron dos acelerómetros K2, cada uno con una antena de GPS.

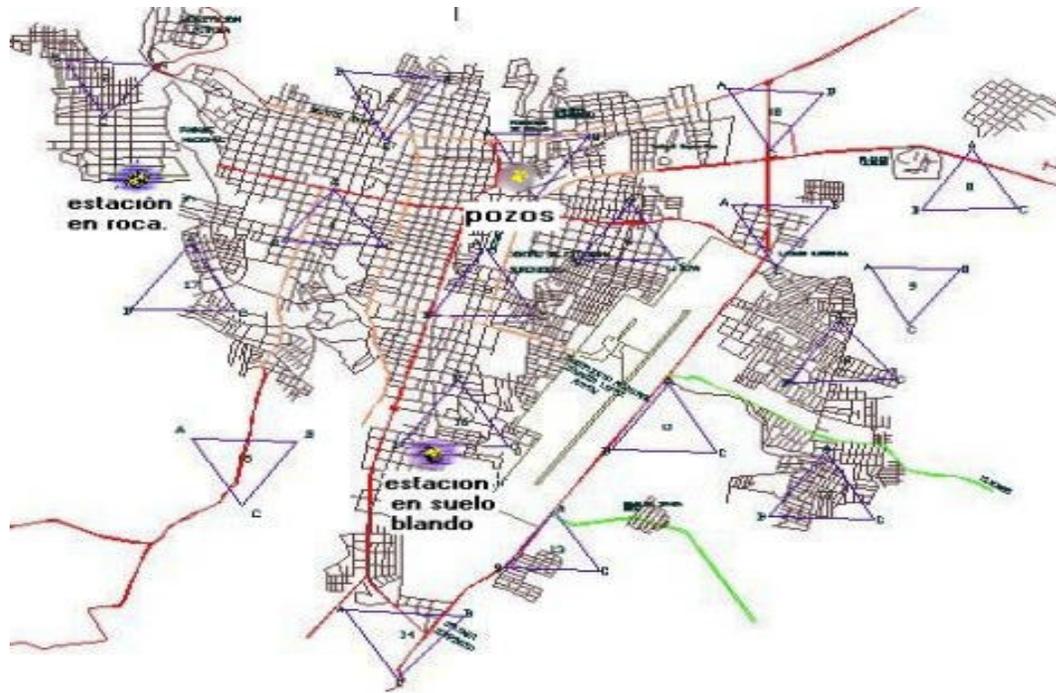


Figura 3. Mapa de la ciudad de Uruapan Michoacán representando la ubicación de los sitios de estudio junto con la ubicación de las estaciones fijas.

Una vez obtenidos los registros de microtremores que se grabaron en formatos binarios, se utilizó una de las utilerías del programa pascal, para unir las tres ventanas de registro de 10 minutos cada una, a fin de que se grabaran en forma consecutiva. Luego se pasaron de formato binario a formato ASCII, para visualizarlas en MATLAB.

Las ventanas que se obtuvieron de 10 minutos equivalen a 600 segundos por lo que al unirlas obtuvimos ventanas de 1800 segundos (ver fig. 4) de grabación, que es el equivalente a 180×103 muestras.

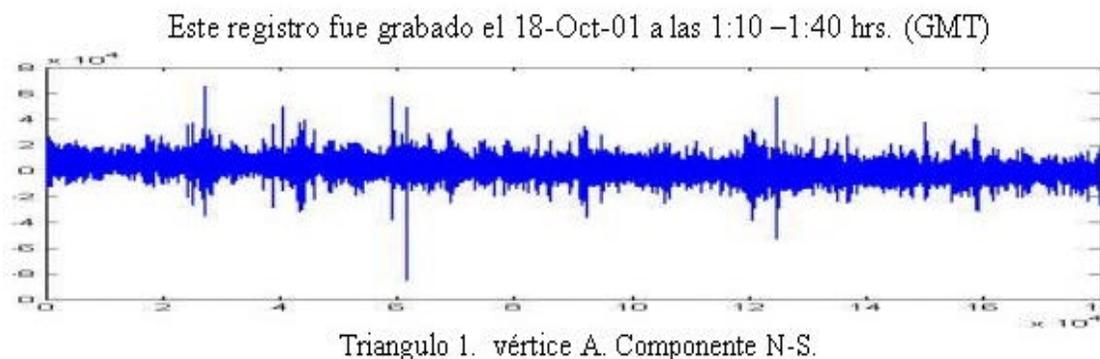


Figura 4. Ejemplo del registro de microtremor observado en el vértice A del triangulo 1, componente NS. En este registro se muestran los 1800 segundos registrados en el tiempo de las tres ventanas, de esta manera se obtuvieron para los 54 vértices de los triángulos.

Al obtener un número grande de muestras nos permite tener resultados mas confiables desde el punto de vista estadístico. Por lo que con la longitud de estos registros se pudieron realizar los análisis en varias ventanas de tiempo.

Para aplicar el método de Nakamura, se consideró necesario decidir que componente horizontal se tomaría en cuenta para calcular los cocientes espectrales, o bien, de que manera combinar el efecto de los componentes horizontales para calcular dichos cocientes ya que Nakamura (1989) no especifica en su trabajo qué componente horizontal utilizar para calcular los cocientes espectrales.

Hay que recordar que, cuando se trabaja con señales de microtremores es importante tomar en cuenta que las fuentes de energía son multidireccionales y por lo tanto, no se conoce la dirección de máximo movimiento. Esto permite esperar, que al considerar el vector de máxima energía horizontal, se obtengan amplitudes mayores (Flores, 2001). Por lo que los cocientes de H/V se calculan:

$$\frac{H}{V} = \frac{\sqrt{(NS(w))^2 + (EW(w))^2}}{V(w)} \quad (5)$$

Esto implica tomar una postura conservadora en cuanto a la evaluación de la amplitud de la amplificación del sitio (Flores, 2001).

Dadas estas consideraciones, en el programa de MATLAB se procede de la siguiente forma:

Se seleccionaron las once ventanas (de 40 segundos cada una) para cada estación.

Se realizó el suavizado de los bordes con las ventana de Von Hann (Kulhanek, 1976).

Se calculó la transformada de Fourier (FFT).

Se calculó la suma vectorial de los componentes horizontales en el dominio de las frecuencias.

Se calcularon los cocientes espectrales para las once ventanas.

Se obtuvo el promedio de los once cocientes espectrales y se calculó una desviación estándar.

Se gráfico el promedio resultante mas/menos una desviación estándar.

Obteniendo así los cocientes H/V de los 54 registros de microtemores como los ejemplos mostrados en las fig.5.

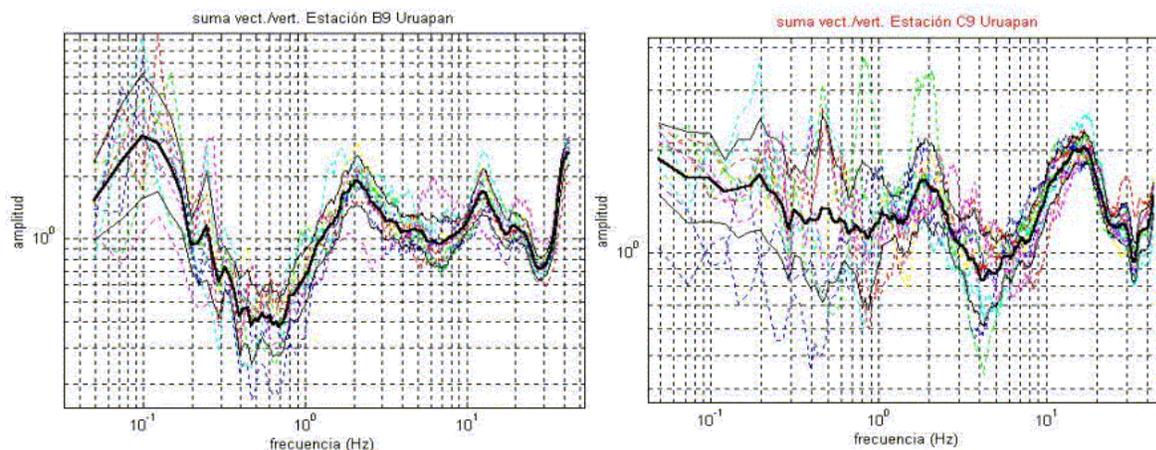


Figura 5. Cocientes espectrales H/V de la estación B9 y estación C9.

Para interpretar estos cocientes, nos apoyamos en los registros del evento ($M_s = 4.5$; Iris.2001), que se registró en las estaciones fijas (en roca y suelo blando) realizándose lo siguiente:

Se seleccionaron los eventos que se grabaron en las dos estaciones.

Se calculó la suma vectorial de las componentes horizontales.

Se hizo el cociente de la estación en suelo blando sobre la estación en roca, con la ec. 6.

$$FT = \frac{SV_S}{SV_R} \quad (6)$$

Adicionalmente se realizó un análisis considerando ventanas de 2026 muestras en diferentes tipos de onda de los registros obtenidos del sismo, se calcularon la FT para ventanas con:

Ondas de Preevento.

Ondas P.

Ondas Secundarias.

Ondas de Coda.

Donde se consideraron las componentes NS y EW tanto en suelo blando como en roca, usando la ec. 7. Se procedió de la siguiente manera;

Se calcula la suma vectorial de las componentes EW y NS.

$$FT = \frac{\sqrt{(EW_S)^2 + (NS_S)^2}}{\sqrt{(EW_R)^2 + (NS_R)^2}} \quad (7)$$

Se obtiene la suma de las componentes horizontales entre la componente vertical, usando las ecuaciones siguientes:

$$\frac{\sqrt{(EW_S)^2 + (NS_S)^2}}{V_S} \quad \text{para la estación en suelo blando} \quad (8)$$

$$\frac{\sqrt{(EW_R)^2 + (NS_R)^2}}{V_R} \quad \text{para la estación en suelo en roca} \quad (9)$$

En resumen se calcularon las Funciones de Transferencia (Suelo blando/roca, SVs/SVR) como las que se muestran en la fig. 6. Así mismo los cocientes espectrales H/V de cada ventana y para cada estación, obteniendo así las gráficas de cocientes espectrales de (H/V) Ondas de Preevento, Ondas primarias, Ondas Secundarias, Ondas Coda en Roca y suelo blando (ver figs. 7 y 8).

RESULTADOS

Con los valores obtenidos en las FT se observó la frecuencia predominante $f_1 = 4.8$ Hz (ver tabla 1). Lo que nos llevo a considerar lecturas en los registros de microtemores H/V considerando frecuencias cercanas a $f_1 = 4.8$ Hz para sitios cercanos a la estación fija en suelo.

Tabla 1. Resultados de Cocientes Espectrales y FT del evento registrado.

	Valores de Cocientes Espectrales H/V (Hz)	Valores de FT (Hz.) S_S/S_R
Ondas de preevento.	4.5	4.8
Ondas Primarias	4.8	5
Ondas Secundarias	4.4	4.6
Ondas Conda	4.25	4.9

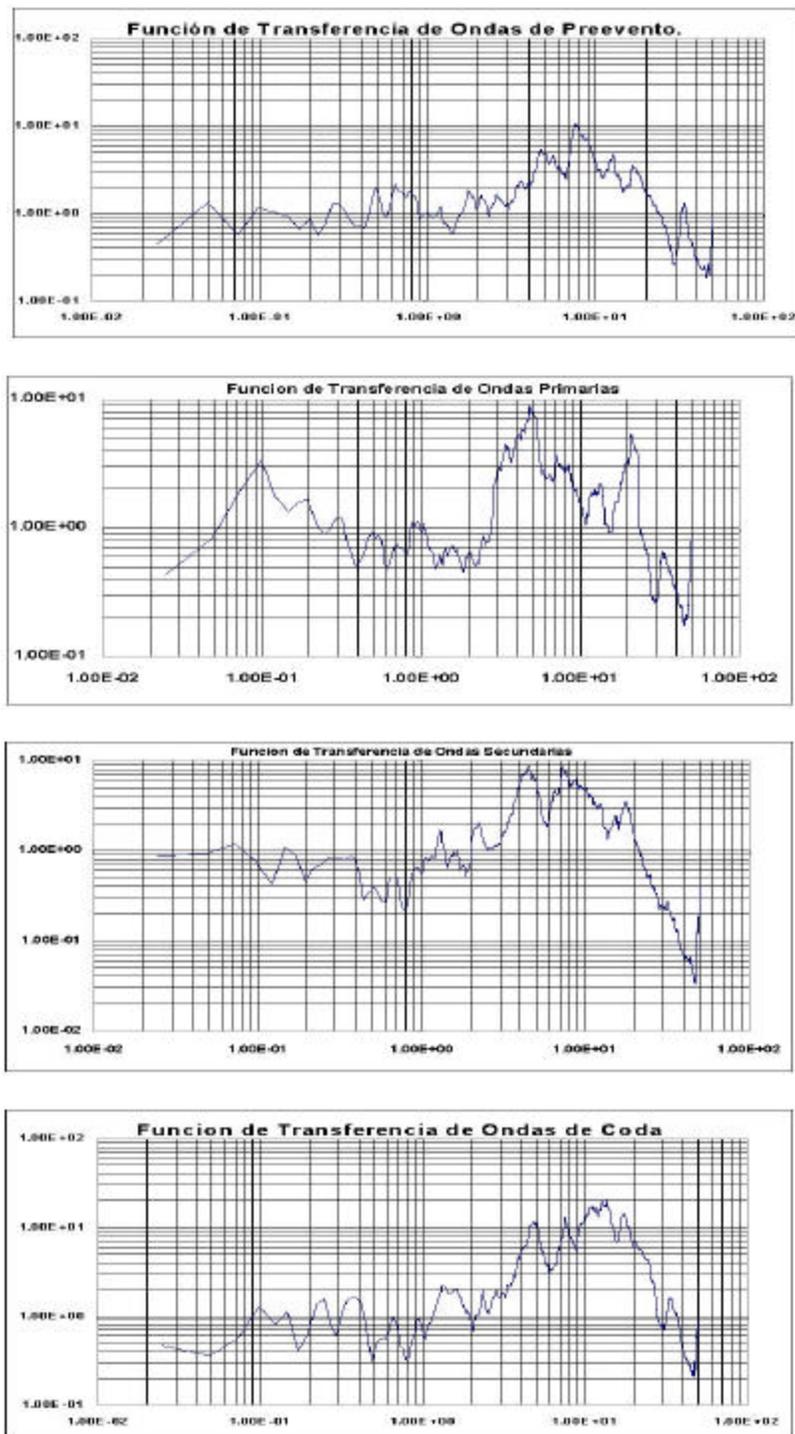


Figura 6. En la parte superior la función de transferencia (SV_s/SV_R) para la parte de preevento, en seguida para las ondas primarias, después para las ondas secundarias y en la parte inferior para las ondas de coda. El eje horizontal se gráfica en logaritmo de la frecuencia en Hz y en el vertical se gráfica el logaritmo de la amplitud (adimensional).

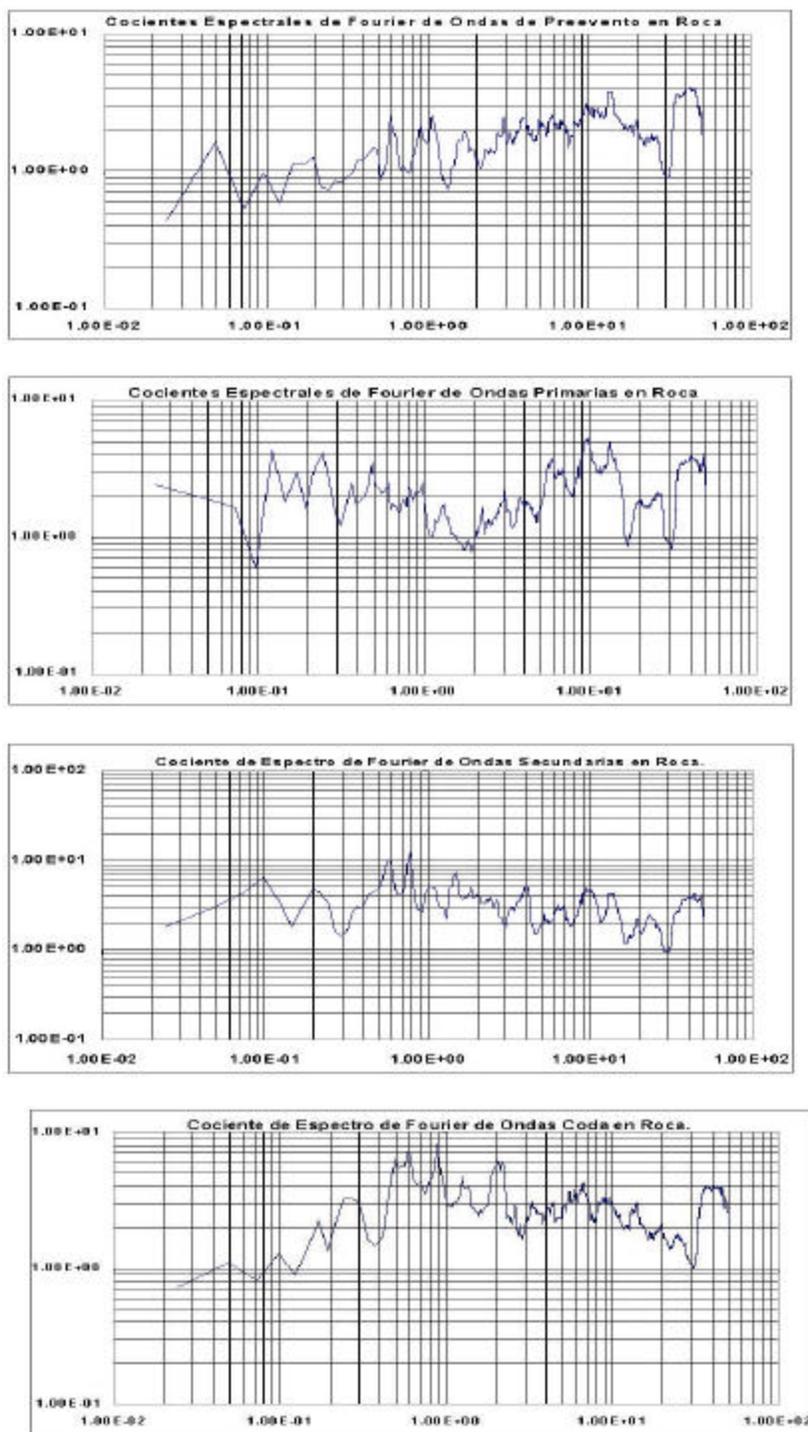


Figura 7. Cocientes espectrales para la estación en roca. En la parte superior el cociente H/V para la parte de preevento, en seguida para las ondas primarias, después para las ondas secundarias y en la parte inferior para las ondas de coda. El eje horizontal se gráfica en logaritmo de la frecuencia en Hz y en el vertical se gráfica el logaritmo de la amplitud (adimensional).

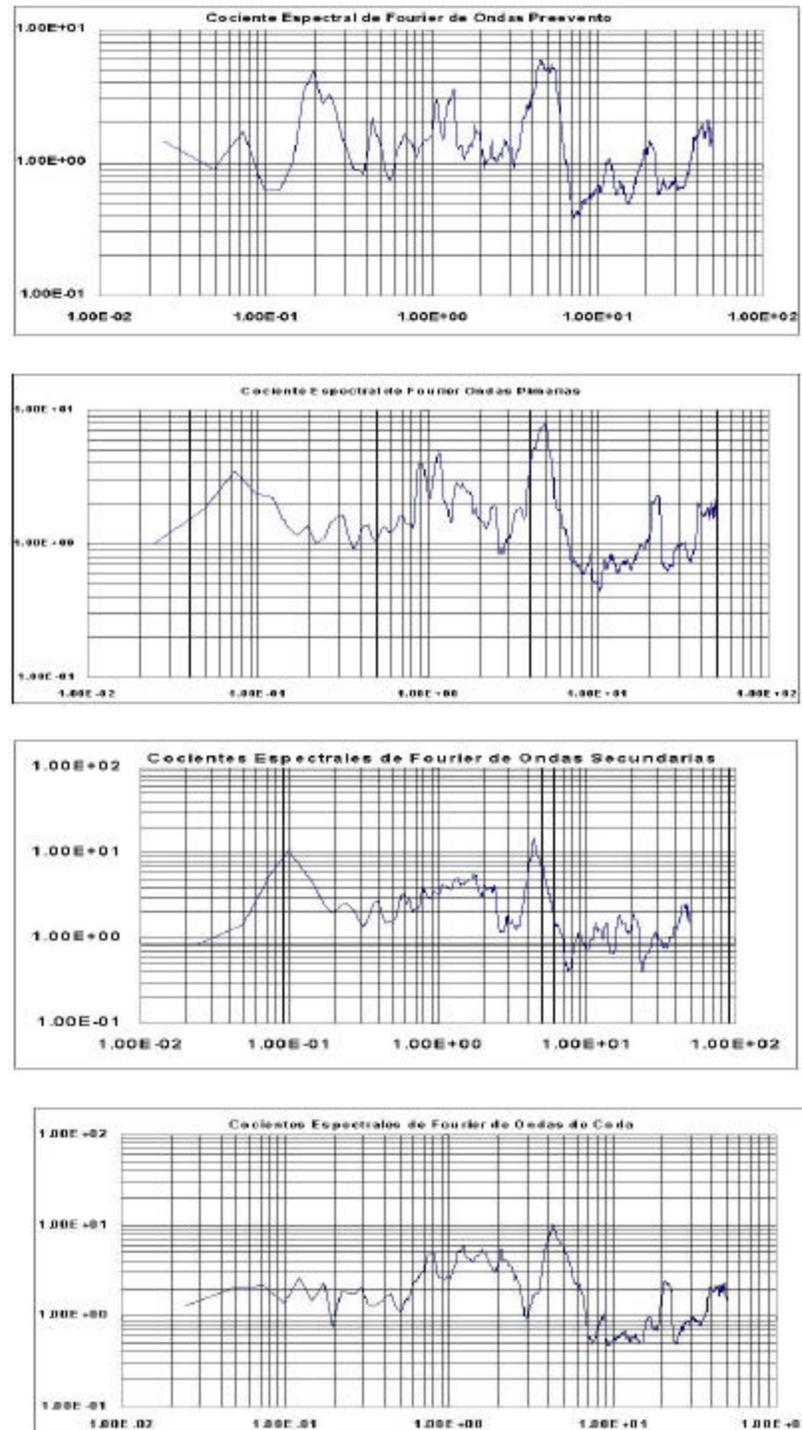


Figura 8. Cocientes espectrales para la estación en suelo blando. En la parte superior el cociente H/V para la parte de preevento, en seguida para las ondas primarias, después para las ondas secundarias y en la parte inferior para las ondas de coda. El eje horizontal se gráfica en logaritmo de la frecuencia en Hz y en el vertical se gráfica el logaritmo de la amplitud (adimensional)

Los cocientes de roca no muestran un pico predominante y aunque el espectro tiende en promedio a comportarse como plano, existen oscilaciones que afectan al hacer la relación SV_S / SV_R . Es por ello que los cocientes espectrales H/V de la estación en suelo blando no coinciden en todos los picos. Aun así tanto en H/V como en SV_S / SV_R persiste la coincidencia de los dos picos.

En la tabla 2 se muestran algunos ejemplos de las lecturas que se obtuvieron a partir de los cocientes espectrales H/V de microtremores haciendo referencia a las FT y a los cocientes espectrales en suelo blando de los eventos sísmicos.

Tabla 2. Muestra los valores en periodos , leídos en las gráficas de Cocientes Espectrales (H/V) de los microtremores en el vértice A de los arreglos.

VERTICES DEL PUNTO (A)	Coordenadas en GMT		Frecuencias	Periodos
	puntos	X	Y	Hz
1	809976	2150680	11.45	0.09
2	809524	2151341	9.00	0.11
3	806996	2151516	2.55	0.39
4	808560	2149979	9.27	0.11
5	809897	2149261	7.60	0.13
6	811197	2149814	7.56	0.13
7	812100	2149778	6.78	0.15
8	814218.963	2150468.57	17.30	0.06
9	813321	2149011	7.10	0.14
10	813046	2148341	9.00	0.11
11	811539.526	2147545.1	8.50	0.12
12	812932	2146703	3.90	0.26
13	810537	2145966	1.60	0.63
14	808668	2144743	4.00	0.25
15	807305.24	2146878.98	2.70	0.37
16	810109	2146780	3.00	0.33
17	807309	2149300	4.90	0.20
18	812050	2151236	3.70	0.27

Con los valores obtenidos de los cocientes espectrales de microtremores de los tres vértices de los 18 triángulos se obtuvo el mapa de isoperiodos de la ciudad de Uruapan Michoacán.

Después del sismo de Colima del 19 de enero del 2000, se colocó un sensor Guralp de banda ancha, que se ubicó cerca de los arreglos triangulares 16 del vértice A y 5 vértice C, de dichos arreglos, grabándose así varios registros de eventos sísmicos. Esto permitió obtener mas datos, y poder dar mas sustento a nuestro trabajo, actualizando el mapa de isoperiodos de la ciudad de Uruapan con la información reciente. Este mapa actualizado se muestra en la fig. 4.

MAPA DE ISOPERIODOS DE LA CIUDAD DE URUAPAN

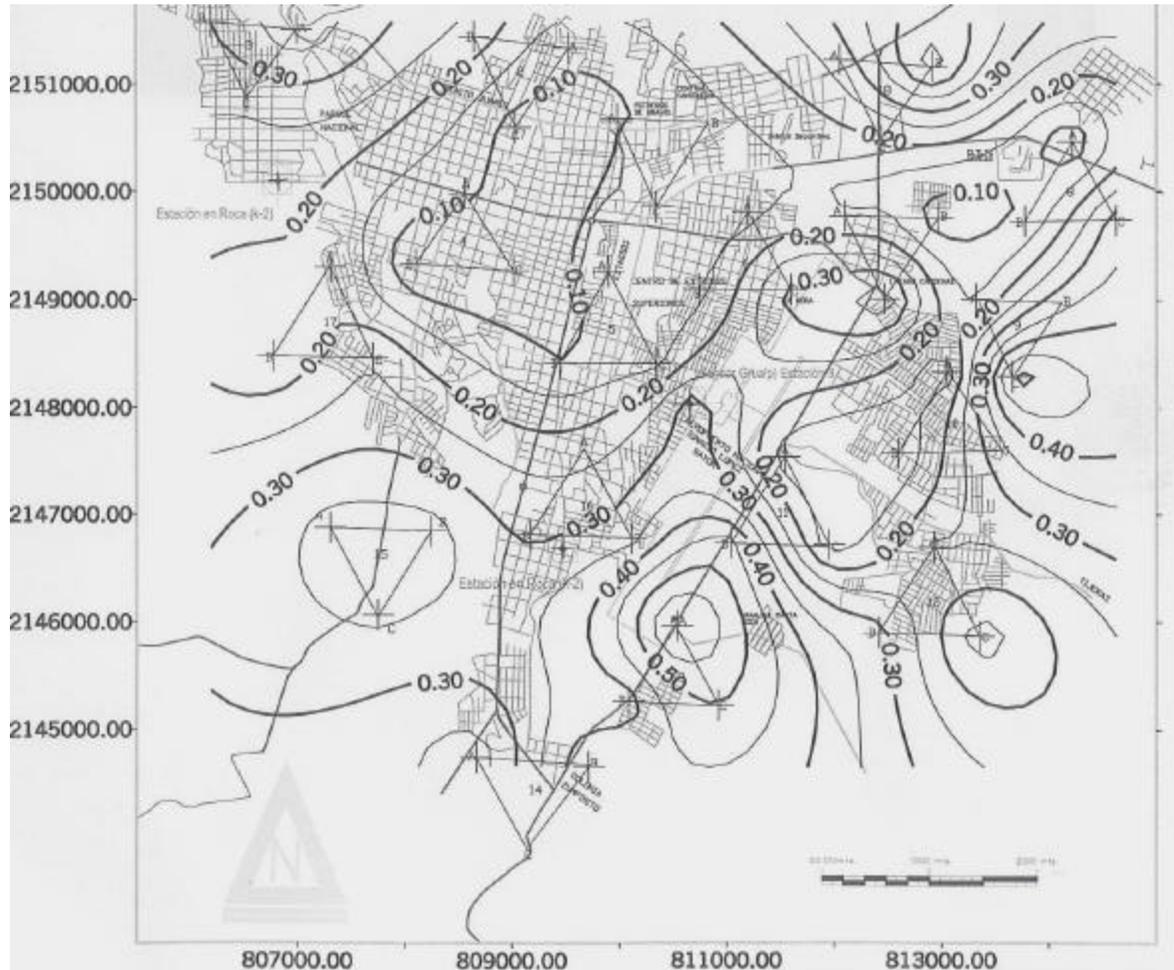


Figura 4. Mapa de isoperiodos de la ciudad de Uruapan Los contornos están dados en segundos, y las acotaciones de los ejes verticales y horizontales están en metros.

CONCLUSIONES

Basados en los valores obtenidos de los cocientes espectrales H/V , y en las funciones de transferencia de Fourier de los eventos registrados en las estaciones semi-permanentes, y con los resultados de los cocientes H/V de microtremores de los 18 arreglos, se estimó el mapa de isoperiodos con periodos máximos de $T=0.6$ segundos y mínimos de $T=0.10$ segundos.

Los resultados obtenidos a partir de las observaciones de microtremores han sido correlacionados con datos de estudios geotécnicos así como con datos de registros de un evento sísmico dándole con ello mayor sustento y robustez a los resultados.

Los periodos mas altos se localizaron hacia el este y sur de la ciudad eso indica que el espesor de los sedimentos se va incrementando en esta dirección. El crecimiento urbano de la ciudad también se desarrolla hacia esa parte.

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos la colaboración de Ernesto Briones, Edgar Mares, Víctor Hernández, Oscar Ochoa y Ulises Rosiles en los trabajos de campo. El desarrollo de este trabajo ha sido posible gracias al apoyo económico al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT (Proyecto37334-T). Una parte de este proyecto a sido financiado por el Instituto de Ingeniería, UNAM (FI³, proyecto 2518).

REFERENCIAS

Flores Estrella H., (2001), “Métodos alternos para la estimación de efectos de sitio mediante el uso de arreglos de microtremores”. *Tesis de licenciatura ., Facultad de Ingeniería. UNAM México*, Marzo 2001.

García Acosta V. y Suárez Reynoso G., (1996), Los sismos en la historia de México, primera edición, tomo1,Ediciones Científicas Universitarias, coedición UNAM y el Fondo de cultura económica.

Garduño M. V. H., Arreigue R.E., Chiesa S., Israde Alcantar I., Rodríguez T,G,M. Y Ayala G. M., (1998), “Las Fallas geológicas y sísmicas de la ciudad de Morelia y su influencia en la amplificación del territorio”. *Ingeniería civil*, Vol. 1, No5. p. 3-12.

Información proporcionada en las oficinas de INEGI en la ciudad de Morelia Michoacán, (2001).

Iris. Servicios de consulta en línea, (2001), <http://www.iris.Washington.edu>.

Jara J. M. y Sánchez A. R., (2001). “Estimación de Riesgo Sísmico de Morelia”. *Revista de la coordinación científica de UMNSH*. No. 29.

Kulhánek, O., (1976), “Introduction to digital filtering in Geophysics.” *Elsevier Scientific Publishing Company*, The Netherlandsd, 168 pp.

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

Singh S. K., Rodriguez M., and Esteva L.,(1983), “Statistics of Small Earthquakes and frequency of Occurrence of large Earthquakes Along the Mexican Subduction Zone”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73 No.6, pp 1779-1796.



ESTUDIO DE MICROTREMOS PARA LA CIUDAD DE URUAPAN MICHOACAN APLICANDO EL METODO SPAC

Ricardo Vázquez Rosas⁽¹⁾, *Jorge Aguirre González*⁽¹⁾, *Horacio Mijares A.*⁽¹⁾,
Víctor H. Garduño Monroy y Eleazar Arreygue Rocha⁽²⁾

Artículo IV-05

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 microtremores 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 microtremores 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 en la ciudad de Uruapan.

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 in Uruapan city.

INTRODUCCION

La ciudad de Uruapan Michoacán se localiza al oeste del estado de Michoacán ($19^{\circ}25'00''$; $102^{\circ}04'00''$) a una altura de 1,600 metros sobre el nivel del mar. Su superficie es de 830.28 kilómetros cuadrados y representa el 1.39 por ciento del total del estado. Es una de las mas importantes dentro de nuestro estado ya que ha tenido un gran desarrollo en cuanto a población y vivienda.

(1) Coordinación de Ingeniería Sismológica, Instituto de Ingeniería, UNAM. Ciudad Universitaria. Apdo. postal 70-472, Coyoacán, 04510 México DF. RvazquezR@iingen.unam.mx, joagg@pumas.iingen.unam.mx

(2) Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, UMSNH. Ciudad Universitaria, edificio U, Morelia Michoacán. vgmonroy@zeus.unimich.mx, arrocha@zeus.unimich.mx

El Estado de Michoacán forma parte de una de las zonas con mas alta sismicidad de nuestro país, donde se han generado sismos históricos de más de 8.0 grados de magnitud (Jara y Sánchez, 2001) por lo que se realizó una recopilación histórica desde 1882 y 1943.

En el estado, se tienen tres fuentes potenciales de generación de sismos:

Los generados por la actividad Volcánica (como los sismos que se produjeron en las erupciones de los volcanes Jorullo en 1759 y Parícutín en 1943).

Los generados por la Tectónica.

- Subducción: sismos producidos por la Placa de Cocos, estos sismos ocurren a profundidades de entre 10 y 30 Km. aproximadamente como ejemplo podemos mencionar los sismos de, 1979 (M 7.4) y 1985 (8.1).

- Intraplaca (rompimiento de litósfera oceánica subducida) : son producto de la subducción pero con epicentro dentro de la placa oceánica bajo el continente. Son sismos poco frecuentes y a mayores profundidades (alrededor de 60 Km.) donde la placa comienza a fundirse, pero que pueden causar grandes daños.

- Fallas Locales (intraplaca dentro de la placa continental). Puesto que los sismos producto de las fallas locales son focos superficiales, esto provoca que la energía liberada, producto de un evento de este tipo incida casi directamente (por ejemplo Falla de Acambay 1912, M =7.0)

Y eventualmente los artificiales (por ejemplo construcción de presas).

Por lo cual es importante tener conocimiento de como se va a comportar el suelo ante un evento sísmico, ya que en la actualidad no se conocen los parámetros de seguridad de riesgo sísmico de cada ciudad, por lo que, los reglamentos de construcción se basan en el establecido para la ciudad de México.

CONTEXTO GEODINAMICO Y GEOLOGIA REGIONAL DE URUAPAN MICHOACAN.

La ciudad se desarrolla en una Zona de acumulación que forma parte de la cuenca del río Cupatitzio. Esta depresión genera que depósitos provenientes de los volcanes monogenéticos rellenen a esta depresión, donde de esta manera se reconocen de la base a la cima de esta ciudad, (ver fig.1). La ciudad de Uruapan se localiza en un límite sur del Cinturón Volcánico Mexicano, en una depresión que fue ocupada por el vulcanismo monogenético del corredor tarasco, este esta descansando sobre rocas graníticas que afloran a pocos kilómetros al sur de la ciudad. (ver fig. 1).

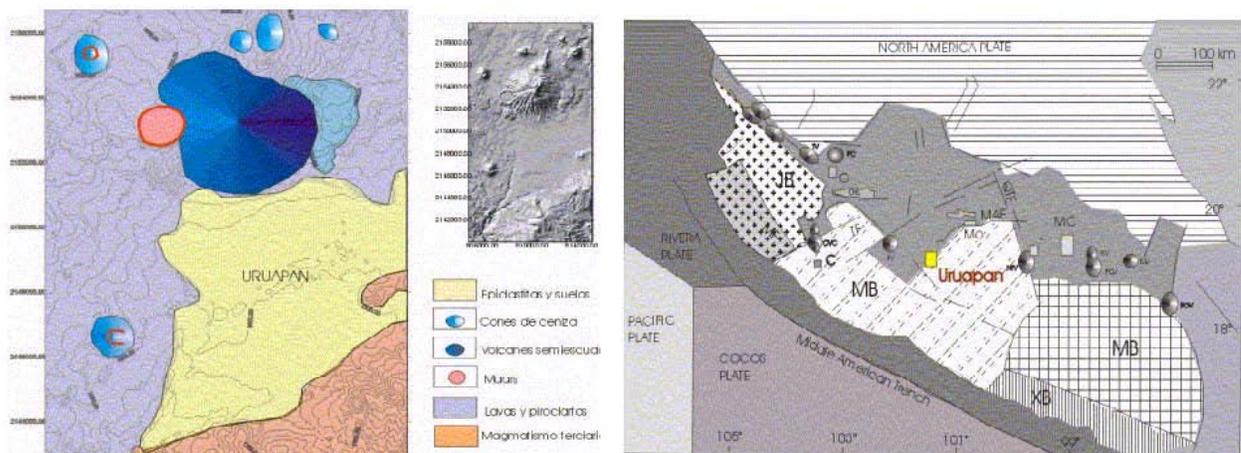


Figura 1. Geología de la ciudad de Uruapan (izquierda) y ambiente tectónico regional .

En Michoacán el fenómeno de los terremotos es una realidad que desde hace siglos ha causado daños en varias poblaciones del estado. Su ubicación geográfica es la principal causa de estos acontecimientos, ya que por un lado, Michoacán se encuentra en el límite de dos placas tectónicas (Pacífica y Norteamericana), además de estar ligado al movimiento de subducción de otra micro placa (Cocos).

Por su parte, Garduño (1999) afirma que los arcos volcánicos del Mesozoico (terreno Guerreo) y la Tectónica edificaron a la Sierra Madre del Sur, ésta es una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias donde se desarrollaron algunas incipientes plataformas calcáreas o en otros casos secuencias distales de rocas terrígenas tipo

turbiditas. Estas secuencias han sido deformadas por dos fases plicativas durante el Cretácico superior, por una tectónica de fallas transcurrentes del Mioceno y por una tectónica primero transtensiva y después distensiva, que afecta al Cinturón Volcánico Transmexicano.

El estado de Michoacán a través de la historia, ha sido testigo de infinidad de movimientos telúricos, como el del 19 de Junio de 1858 (Mg = 7.0), o el del 19 de Septiembre de 1985 (Mg = 8.1), que desgraciadamente, derivaron en pérdidas humanas y materiales. El estado Michoacán como podemos observar en el mapa (Fig. 2) de isosistas acumulado (Carlos Gutiérrez CENAPRET) a partir de 1945-1985 se observa que el estado esta dentro de las zonas mas afectadas por sismos.

REVISIÓN HISTÓRICA DE LA SISMICIDAD DE URUAPAN (1858 – 1943)

En este párrafo se describen algunos datos históricos de eventos sísmicos que se han sentido en la ciudad de Uruapan (García y Suárez ,1996).

- 19 de junio de 1858, Uruapan, Terremoto espantoso, 9:05 am. Donde el sacudimiento causó fuertes daños de templos y casas y varias desgracias personales.
- 19 de Julio de 1882. Uruapan, Temblor de Trepidación. De (...) 1 a 2:25 pm.

Mapa de intensidades de la sismicidad la república Mexicana representando el acumulado para Zamora Michoacán a partir de 1945-1985 (CENAPRED).

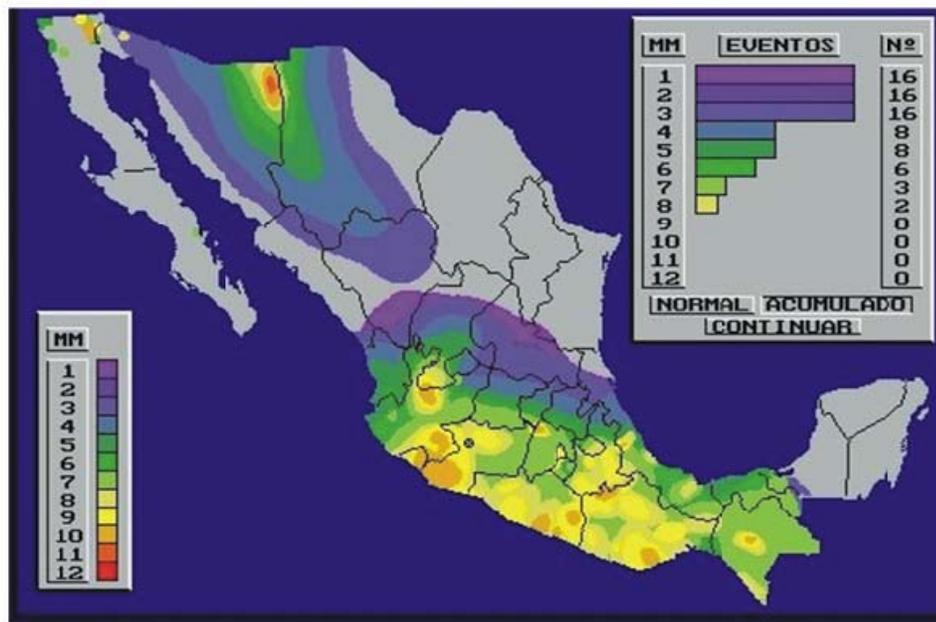


Figura2. Mapa de isosistas acumulado de 1945-1985(CENAPRET)

- 9 de Febrero de 1886. Uruapan, Temblor de Oscilación de Sur a Norte. De 3:30 am, fuerte sacudimiento, por espacio de 2 segundos. Después se repitió media hora.
- 12 de Noviembre de 1891. Uruapan, Fuerte Temblor Oscilatorio de SE a NE. de 10: 11 am. Con duración de 3 segundos.
- 16 de Marzo de 1895. Uruapan, 2 Temblores uno de Trepidación y otro Oscilatorio con intervalos de

segundos.

- 5 de Abril de 1895, (...) Fuerte temblor oscilatorio S a N. entre 2: 30 y 3.00 am. con duración de 3 y 4 segundos que repitió como a los 5 segundos.
- 18 de Enero de 1906, Uruapan, Temblor Trepidatorio, de 12:15 pm. con una duración de 5 segundos y prolongados ruidos subterráneos.
- 20 de Agosto 1906, Uruapan, Temblor Oscilatorio y Trepidatorio dirección NO a SE, a las 11:54 pm. con duración de 25 segundos.
- 14 de Abril de 1907, Uruapan , Temblor Oscilatorio de NS, a las 00:35 am.
- 12 de Mayo de 1910, Uruapan , Temblor Oscilatorio NO-SE duración de 55 segundos.
- 7 de Junio de 1911, Uruapan , Temblor Oscilatorio NS con una duración de 2 minutos y M=4 causó varios desperfectos en algunos edificios.
- 31 de Enero de 1912, Uruapan Temblor Oscilatorio, con una duración de 8 segundos.
- 14 de Febrero de 1943, sentidos ligeros en Uruapan (...).
- 23 de Marzo de 1943 , Uruapan Temblor Oscilatorio sentido fuerte.

ANTECEDENTES LOCALES DE URUAPAN MICHOACÁN

Localización: Se localiza al Oeste del estado a una altura de 1,600 m sobre el nivel del mar. Su superficie es de 830.28 Km² y representa el 1.39% de total del estado.

Su Población y Vivienda.

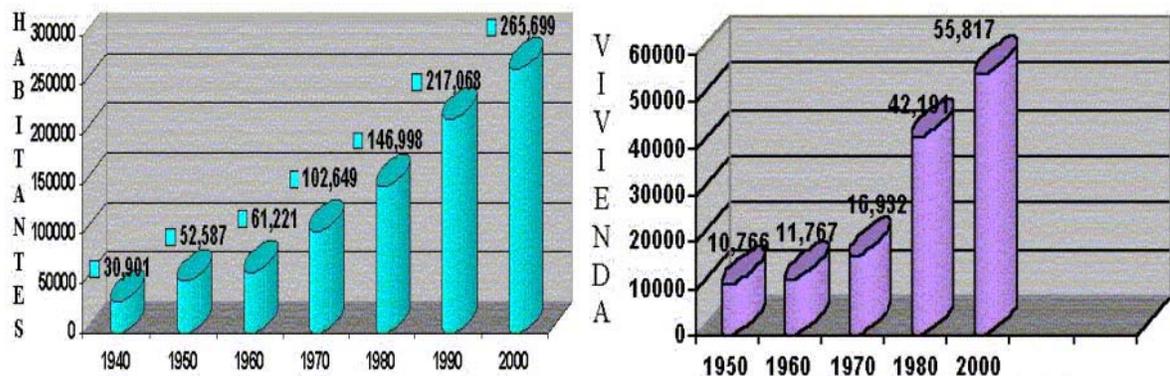


Figura 3. Crecimiento de población y crecimiento de vivienda (INEGI,2001).

La ciudad de Uruapan es una de las ciudades mas importantes del estado de Michoacán, ya que ha tenido un gran crecimiento en cuanto a población y vivienda. Como podemos observar en la fig. 3 es muy clara la diferencia de población entre 1980 y 2000 que es de 119000 habitantes y equivale a un crecimiento poblacional del 80.95 % en 20 años. Mientras que en vivienda se tiene registrada del año 1970 al 2000, una diferencia de 38,885 viviendas que representaría el 229.65 % de crecimiento de vivienda en 30 años.

MÉTODO SPAC

El método SPAC tiene el propósito de obtener el modelo estructural a partir de registros de microtemblores. Para ello se requiere registrar microtemblores 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.

Seguendo 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 $u(r,\theta,\omega,t)$, las cuales son observadas en el centro C del arreglo y en el punto sobre el círculo de radio r . Entonces la función de autocorrelación espacial se define como:

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

(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 en todos los sitios de observación que se encuentran en el arreglo circular, esto es:

(2) $\phi(0,\omega)$

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

$$\phi(0,\omega) = J_0 \left(\frac{\omega r}{c(\omega)} \right)$$

(3) $J_0(\cdot)$

Donde J_0 es la función de Bessel de primer especie y de orden cero, c 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: \int_0^2

(4) $\text{Re}[\cdot]$

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

APLICACIÓN DEL MÉTODO DEL METODO SPAC.

La ciudad de Uruapan se realizaron mediciones de microtemores usando sensores Guralp de tres canales de banda ancha. De acuerdo a las dimensiones de la ciudad se propusieron 18 arreglos en forma de triángulos equiláteros, de una distancia de 1km. Entre cada uno de sus vértices procurando cubrir toda la ciudad, y al mismo tiempo tener el mayor número de registros posible.

Se instalaron también dos acelerómetros K2 que se ubicaron: en dos tipos de suelo, uno en roca y otro en suelo blando. Estos acelerómetros se quedaron instalados durante un mes, dentro del cual se logro registrar un evento sísmico que fue de gran apoyo para este trabajo de investigación.(Fig. 5)



Figura5. Sensor reftek- das k2

Anteriormente con los datos del presente trabajo se realizó un estudio de microtremores usando el método de Nakamura obteniendo así el periodo fundamental, en los que se determinaron periodos máximos de alrededor de $T = 0.6$ seg. y mínimos de $T = 0.10$ seg. Con estos valores de periodos se elaboró la propuesta de Microzonificación sísmica de la ciudad de Uruapan Michoacán (Fig. 6) con el fin de que este mapa pueda servir de base para estudios de riesgo sísmico así como apoyo para la elaboración o actualización del reglamento de construcción, y obteniendo así el mapa de microzonificación sísmica de la ciudad de Uruapan.

MAPA DE ISOPERIODOS DE LA CIUDAD DE URUAPAN

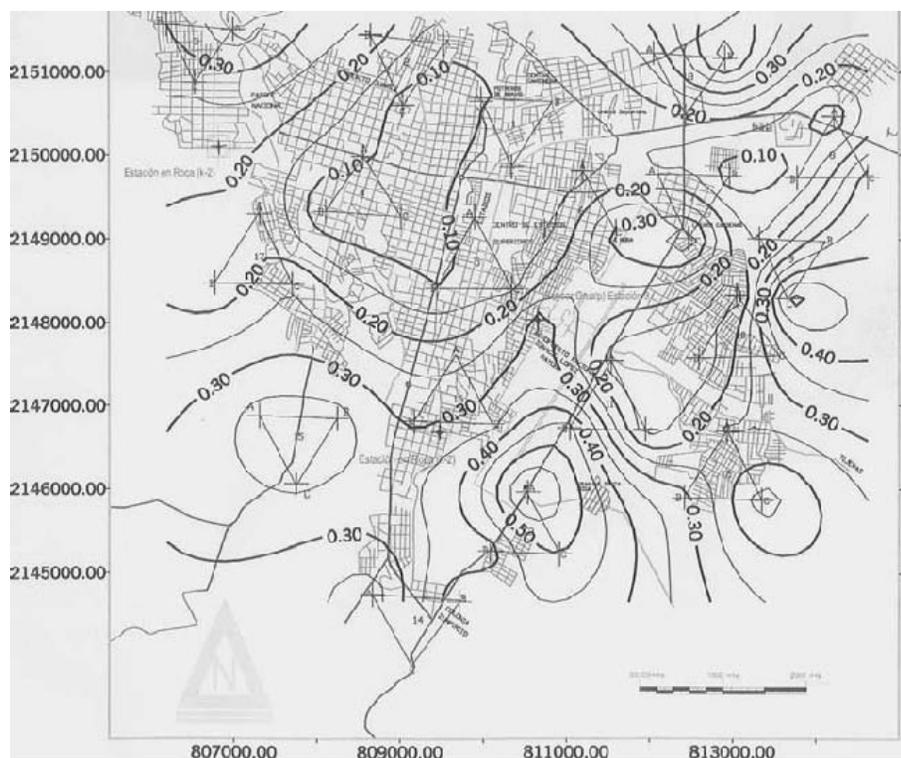


Figura 6. Mapa de isoperiodos de la ciudad de Uruapan Los contornos están dados en segundos, y las acotaciones de los ejes verticales y horizontales están en metros.

Ahora para el presente trabajo aplicaremos el método SPAC a los datos de microtremores. Primero calculando la curva de dispersión de ondas Rayleigh y, a partir de ella, estimar un modelo de velocidades para cada arreglo. Después con la información de todos los arreglos, llegar ha obtener un modelo tridimensional.

Pre-Procesado:

Se 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 con un programa en Fortran.

Se leen los archivos truncados con un encabezado.

Se leen ventanas de tiempo seleccionadas de (81.92 segundos).

Se obtienen los espectros de potencia para cada ventana y cada estación.

Se calculan los coeficientes de correlación.

Aplicación del método SPAC en 18 arreglos realizados en toda la ciudad con registros de 1800 segundos de grabación con arreglos instrumentales de 950m cada uno, Como se muestra a continuación. En siguiente figura se muestra un registro de 1800 seg. De uno de los 18 arreglos.

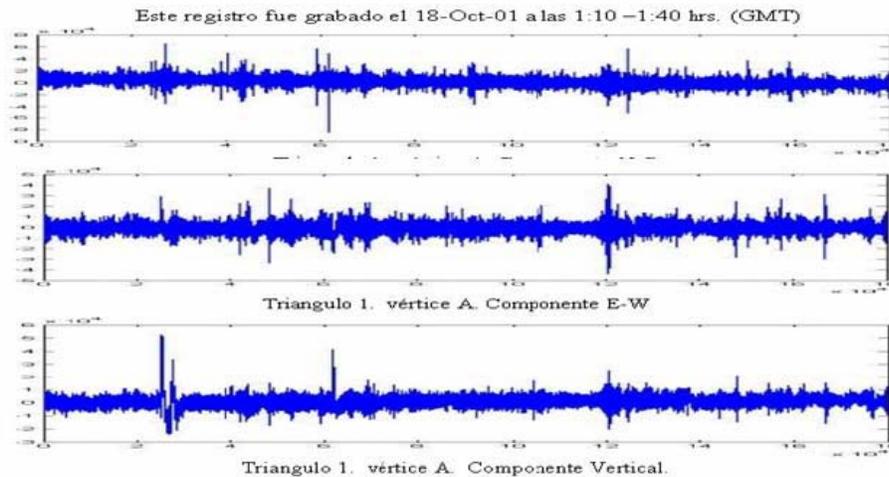


Figura7. Arreglo 1 dirección NS ventana de 30 minutos. Las unidades en el eje horizontal están en segundos y en el eje vertical están en cuentas.

Una vez truncadas las señales se seleccionaron 21 ventanas de 81.92 segundos para después procesarlas, y se obtiene la correlación de unidades, el suavizado, obtenemos los espectros de potencia para cada uno de los vértices (Figuras 8,9 y 10).

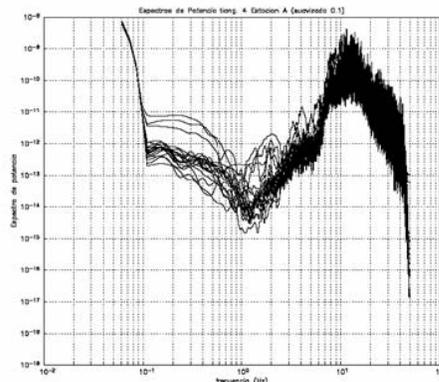


Figura 8. Espectro de potencia para el arreglo 4 mostrando para las 21 ventanas (vértice A).

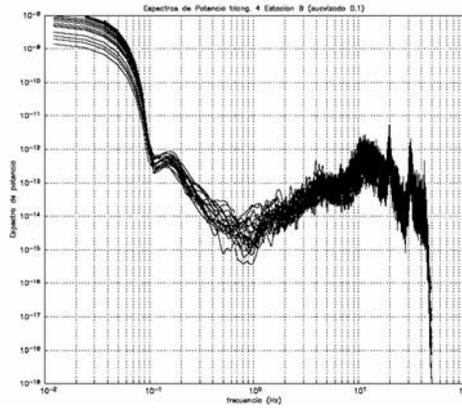


Figura 9. Espectro de potencia para el arreglo 4 mostrando para las 21 ventanas (vértice A).

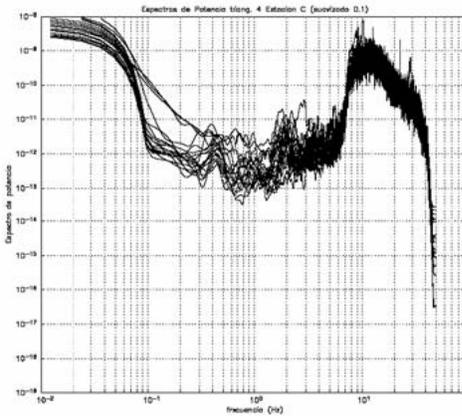


Figura 10. Espectro de potencia para el arreglo 4 mostrando para las 21 ventanas (vértice A).

Para cada una de las 21 ventanas se obtienen los coeficientes de correlación. Para el ejemplo que hemos tomado del arreglo 4 (de 950 metros de abertura) las correlaciones son mostradas en las Figura 11. En cada cuadro aparecen las cross-correlaciones normalizadas para las tres vértices (lo que corresponde a la parte que se encuentra dentro de la integral de la ecuación 4) donde estas correlaciones se obtuvieron para cada uno de los arreglos y seleccionando todas aquellas que tuvieran el mismo cruce por cero en la misma frecuencias y que tuvieran la misma similitud entre ellas donde una vez Seleccionadas se vuelven a calcular los espectros para las ventanas seleccionadas y las correlaciones.

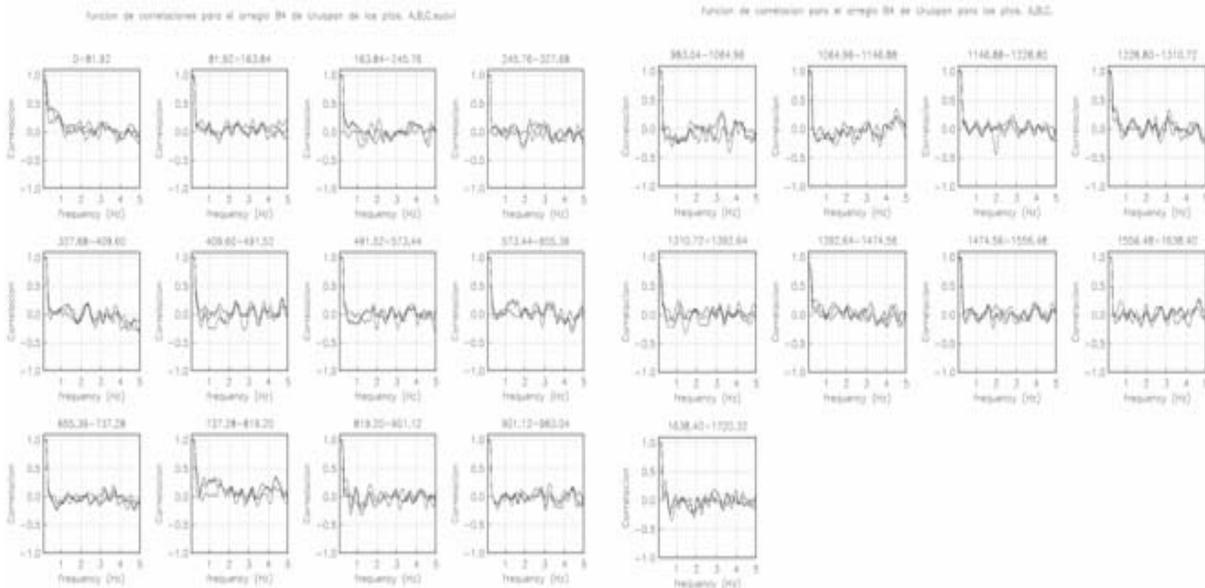


Figura 11. Ejemplo de correlaciones calculadas entre las tres estaciones para las primeras doce ventanas de 81.92 segundos.

Después de calcular las funciones de correlación se seleccionaron todos aquellos que mas se parecieran a una función Bessel de orden cero, y cuidando también los cruces por ceros, que estos cruces estuvieran en el mismo rango de frecuencias y seleccionando todas aquellas que mejor tuvieran similitud entre ellas. Una vez realizado esto se procede a calcular el coeficiente de correlación para cada arreglo considerando los tres vértices, del cual para el presente trabajo se muestra para el arreglo 4 con 8 ventanas seleccionadas. Fig. 12

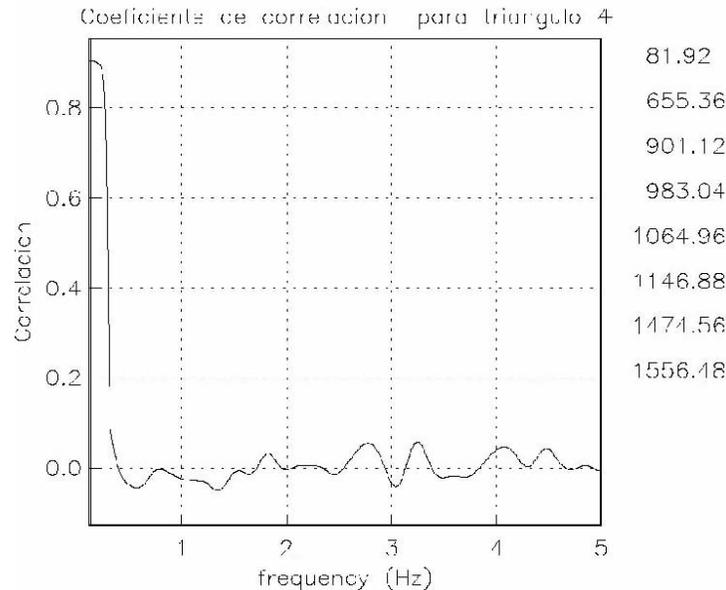


Figura 12. Ejemplo del coeficiente de auto-correlación obtenido para el arreglo 4.

Una vez seleccionados las mejores correlaciones se calcula la curva de dispersión para cada uno de los vértices como se muestra en la Figura 13, en esta figura solo se grafican las secciones de curvas comprendidas entre líneas rectas que delimitan el abanico de confiabilidad según lo definió Miyacoshi (1995).

En la misma grafica aparece la curva de dispersión calculada con la estratigrafía mostrada en la tabla de la parte superior derecha de la misma figura. El modelo estratigráfico fue obtenido por ensayo y error, a partir del modelo inicial propuesto.

DISCUSIÓN Y RESULTADOS.

Todo este procedimiento se realizó para cada uno de los arreglos instrumentales realizados en la ciudad de Uruapan Michoacán. Sin embargo por razones prácticas, a continuación únicamente se muestran los resultados tabla 1.

En los arreglos realizados en la ciudad de Uruapan Michoacán solo se pudo obtener la curva de dispersión para 5 sitios (Fig. 14) de la zona de estudio, debido a que la mayoría de los arreglos no tenía buena correlación entre las señales de los tres vértices. De los cinco arreglos estudiados la estructura de velocidades fue aproximada usando un modelo de una capa muy gruesa debido al rango de frecuencias que este tamaño de arreglo nos permitió analizar. Las condiciones físicas de los sitios, como es la presencia de los ríos y la topografía del lugar, es un factor muy importante que puede explicar la falta de correlación entre señales situadas en condiciones físicas distintas. En términos generales hay una coincidencia con el cause de los ríos que atraviesa la ciudad y los arreglos que no tuvieron buena correlación.

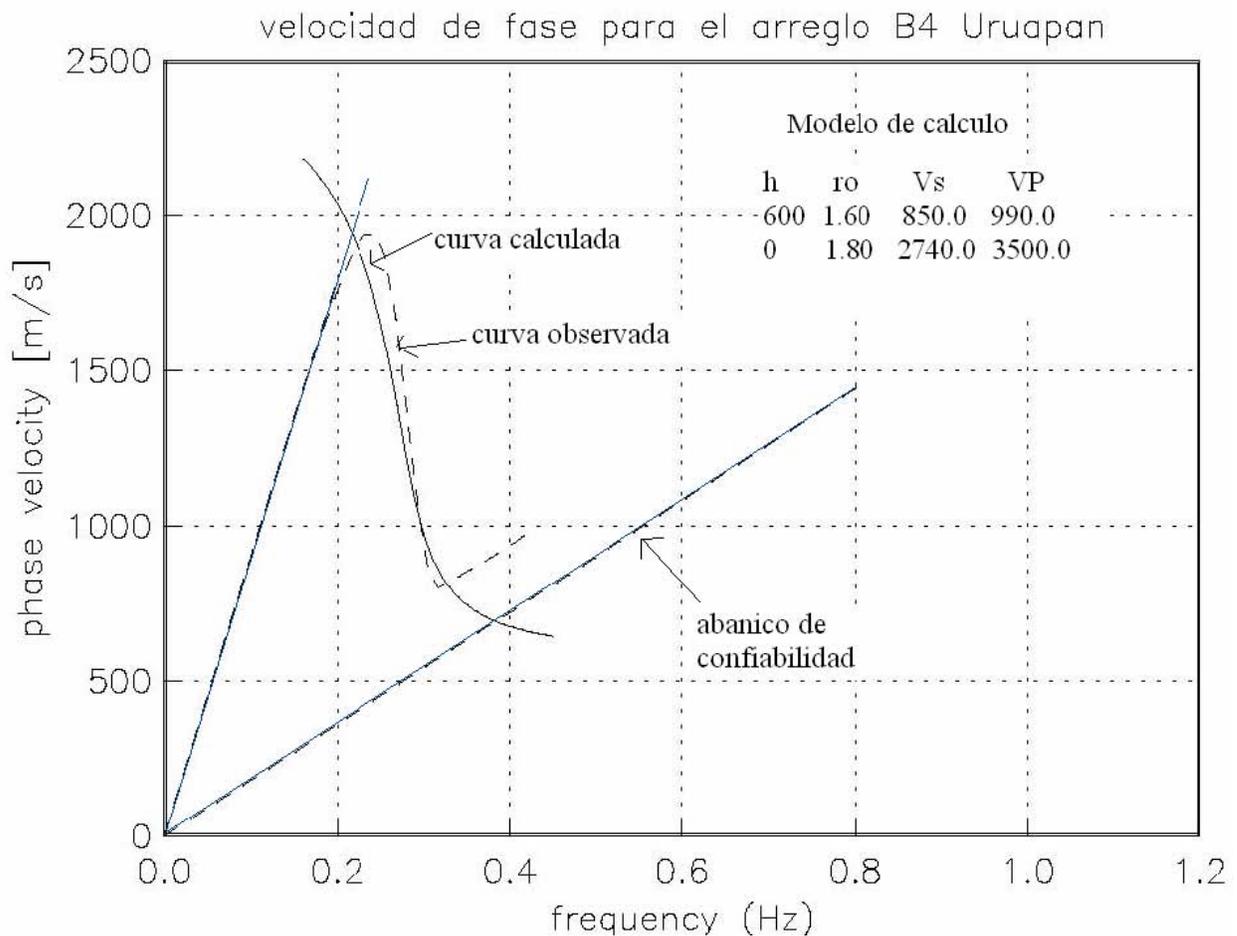


Figura 13. Curva de dispersión observada para los tres vértices ABC (línea punteada) y la curva calculada (línea continua) y su abanico de confiabilidad. En el recuadro aparece el modelo de velocidades de la curva calculada.

Como es puede ver en al figura 14 de acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que hacia la parte sur de la ciudad no se pudo obtener correlaciones con aberturas en los arreglos de 950 m. Para obtener resultados más precisos se deberán realizar mediciones pero con arreglos más pequeños. Es decir hacer mediciones en varios triángulos de menores aberturas en la zona sur de la ciudad de Uruapan.

Tabla 1. Resultados de las curvas dispersión calculadas para la ciudad de Uruapan Michoacán

Arreglo	Espesor y semi- espacio	ro	Vs	Vp
1	445	1.60	1590.0	1770.0
	0	1.80	2310.0	2950.0

2	245	1.60	1780.0	1950.0
	0	1.80	1440.0	2800.0
8	560	1.60	890.0	1300.0
	0	1.80	3000.0	3900.0
14	690	1.60	1280.0	1400.0
	0	1.80	2900.0	4800.0

Mapa de los arreglos calculados con el método SPAC para la Ciudad de Uruapan Michoacán

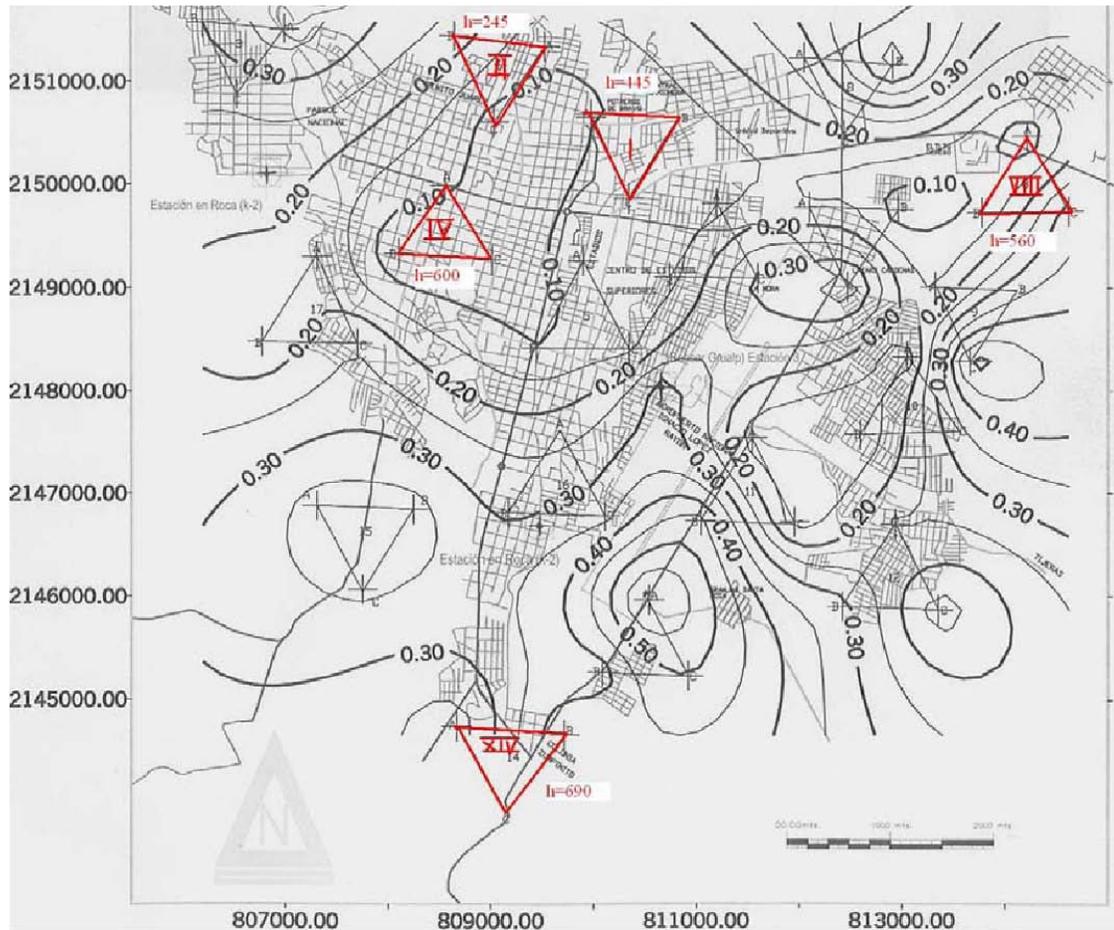


Figura 14. muestra el mapa de isoperiodos calculado y muestra los arreglos los cuales se pudo estimar la estructura de velocidades, los contornos estan dados en segundos y las acotaciones del plano están en UTM

CONCLUSIONES.

Se analizaron 18 arreglos instrumentales en la ciudad de Uruapan. En cada arreglo se contó con registros de 30 minutos consecutivos grabados simultáneamente en tres estaciones localizadas en los vértices de los triángulos equiláteros y separadas 950m. una de otra. Se utilizaron sensores Guralp de banda ancha (30 segundos) conectados a Reftek.

Los cinco sitios que presentaron buenas correlaciones fueron modelados utilizando modelos de una sola capa de velocidades superiores a los 850 m/s para las ondas S. es necesario correlacionar estos resultados con otras fuentes de información como pueden ser la información de pozos.

Una de las posibles explicaciones de la falta de correlacion en las estaciones restantes es la presencia del cause de rios. Por ello se propone, para mejorar los presentes resultados, realizar arreglos de menor abertura.

REFERENCIAS

- Aki, K., 1957. Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 35, 415-456.
- 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.
- Flores Estrella H., (2001), "Métodos alternos para la estimación de efectos de sitio mediante el uso de arreglos de microtremores". *Tesis de licenciatura*., Facultad de Ingeniería. UNAM México, Marzo 2001.
- García Acosta V. y G. Suárez Reinoso (1996), Los sismos en la historia de México, primera edición, tomo1, Ediciones Científicas Universitarias, coedición UNAM y el Fondo de cultura económica.
- Garduño M. V. H., R. E. Arreigue, S. Chiesa, I. Israde Alcantar, T. G. M. Rodríguez y G. M. Ayala (1998), "Las Fallas geológicas y sísmicas de la ciudad de Morelia y su influencia en la amplificación del territorio". *Ingeniería civil*, Vol. 1, No5. p. 3-12.
- Información proporcionada en las oficinas de INEGI en la ciudad de Morelia Michoacán, (2001).
- Iris. Servicios de consulta en línea, (2001), <http://www.iris.Washington.edu>.
- Jara J. M. y A. R. Sánchez (2001). "Estimación de Riesgo Sísmico de Morelia". *Revista de la coordinación científica de UMNSH*. No. 29.
- Kulhánek, O., (1976), "Introduction to digital filtering in Geophysics." *Elsevier Scientific Publishing Company*, The Netherlands, 168 pp.
- Miyakoshi, 1995. Tesis Doctoral (en japonés), Universidad de Hokaido.
- Nakamura, Y., (1989), "A method for dynamic characteristics estimation of surface using microtremor on the ground surface." *QR of R.T.*, 30-1.
- Singh S. K., M Rodríguez and L. Esteva L., (1983), "Statistics of Small Earthquakes and frequency of Occurrence of large Earthquakes Along the Mexican Subduction Zone". *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73 No.6, pp 1779-1796.
- Vazquez Rosas R, (2002), "Propuesta de microzonificación sísmica para la ciudad de Uruapan Michoacán". *Tesis de licenciatura*., Facultad de Ingeniería UMSNH Morelia Mich. Noviembre 2002.