

Capítulo V

V.1 Discusión de resultados

Los resultados de la aplicación de los métodos de Nakamura y SPAC se han presentado en el capítulo anterior. A continuación se realiza la discusión para cada sitio en el que fueron aplicados.

V.1.1 Sitio Tulyehualco

Para la aplicación del método de Nakamura primero se realizaron pruebas estadísticas con la finalidad de definir: qué tipo de señal utilizar, el tamaño de la ventana de datos, y cómo combinar el efecto de los componentes horizontales. De estas pruebas se concluyó lo siguiente:

- Es más conveniente utilizar ventanas de tiempo que contengan señales estacionarias, ya que el promedio de los cocientes espectrales que consideran este tipo de señal presentan una menor desviación estándar.
- Del análisis realizado con ventanas de veinte y cuarenta segundos se observó que la definición de los picos en el rango de interés (0.1-10 Hz.) es mejor cuando se consideran ventanas de cuarenta segundos.
- La mejor manera de combinar el efecto de los componentes horizontales resultó ser la suma vectorial de los mismos. De la comparación de los cocientes que consideran los componentes horizontales por separado o el promedio de éstos, el cociente que considera la suma vectorial de los componentes horizontales sobre el componente vertical resultó tener una menor desviación estándar, mejor definición de los picos dominantes y mayor amplitud de los mismos.

Con estas conclusiones, se procedió a aplicar el método de Nakamura a los datos de una arreglo instrumental realizado en Tulyehualco, con tres estaciones y cuatro aberturas distintas; se calcularon promedios por abertura, por líneas y un promedio general; este último con la finalidad de obtener un valor representativo de la frecuencia fundamental de la zona.

Una de las principales observaciones en estos tres promedios fue la estabilidad temporal y espacial de los registros que se refleja en la forma similar de los cocientes y en el comportamiento de la desviación estándar de manera estable, estas dos características son favorables en la evaluación de cocientes espectrales. Con la información obtenida la frecuencia fundamental del sitio se ubicó en 0.22 Hz. (4.5 seg.) (que coincide con la reportada por Lermo y Chávez-García (1994b) para la zona de estudio), con una amplitud de 10.5.

Posteriormente se aplicó el método SPAC al mismo conjunto de datos, para lo que se seleccionaron sólo las ventanas que tuvieran mejor correlación. A pesar de que los coeficientes de correlación fueron altos y con un comportamiento más o menos estable, no

fue posible estimar el modelo estructural del sitio debido a las distancias tan cortas entre estaciones.

Por esa razón se realizó un segundo arreglo instrumental en Tulyehualco con una distancia de 800 metros entre estaciones, con algunos problemas de planeación que ocasionaron que las estaciones se ubicaran en unidades litológicas distintas (figura 4.40).

Al aplicar el método de Nakamura a los datos de este arreglo (figuras 5.1 y 5.2) se observa lo siguiente:

- los cocientes para las cuatro estaciones muestran un pico cerca de 0.1 Hz.,
- las desviaciones estándar tienen un comportamiento similar para las cuatro estaciones,
- los cocientes no reflejan los cambios de litología entre las estaciones 2, 3 y 4,
- los cocientes no reflejan la misma litología entre las estaciones 1 y 2.

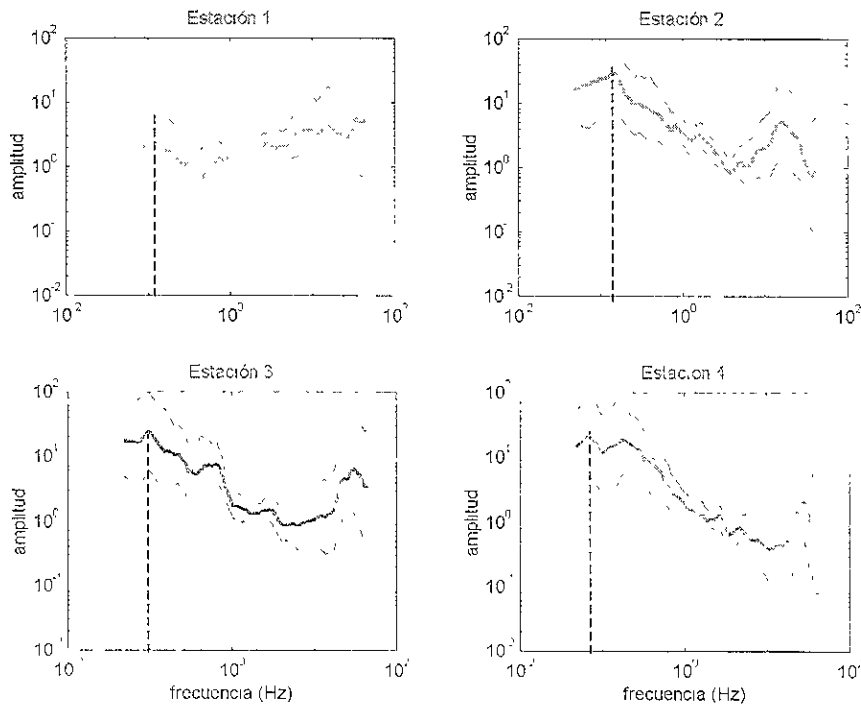


Figura 5.1. Cocientes de Nakamura por estación para el segundo arreglo de Tulyehualco.

Al igual que para el primer arreglo realizado en Tulyehualco, se obtuvo el promedio general para resaltar las tendencias generales de la región. Sin embargo, a diferencia del primer arreglo (ver figura 4.17) para este arreglo se observa una gran dispersión de los

datos en bajas frecuencias, la curva tiene un comportamiento muy suave y no se observa ningún pico importante (figura 5.2), esto debido, probablemente, a la distancia entre estaciones (800 m).

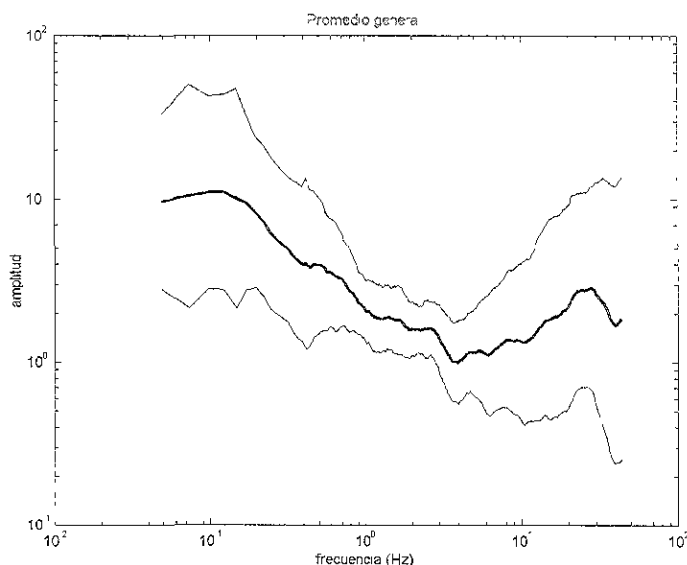


Figura 5.2. Promedio general para el segundo arreglo de Tulyehualco.

Cuando se aplicó la técnica SPAC, el efecto de que las estaciones estuvieran en distintas litologías fue más evidente. Los coeficientes de correlación no fueron buenos, y se presentó la particularidad de que las estaciones se correlacionaran por pares según la litología en que se asentaron (1-2 y 3-4) (figuras 4.42 y 4.43).

Aun con la distancia entre estaciones de 800 metros, las curvas de dispersión obtenidas no proporcionaron la información necesaria para estimar el modelo de velocidades. Sin embargo, si consideramos que la curva de dispersión en altas frecuencias tiende asintóticamente a la velocidad de las capas superficiales, entonces, podemos decir, cualitativamente, que la velocidad del aluvión es mayor que la de los depósitos lacustres (figura 4.42).

V.1.2 Sitio Ciudad Universitaria

A partir de los resultados obtenidos en Tulyehualco, surgió la inquietud acerca de la aplicabilidad de la técnica de SPAC a los registros obtenidos y a las condiciones de la Ciudad de México, por lo que se realizó un arreglo instrumental en CU, ya que el modelo estructural de este sitio ha sido estudiado en varios trabajos.

El arreglo en CU tuvo una distancia entre estaciones de 1 km., se utilizaron los mismos instrumentos, los mismos programas y, en general, el mismo procesamiento que el utilizado para los datos de Tulyehualco.

Es claro que las condiciones geológicas de CU son completamente distintas a las de Tulyehualco; en CU se tiene una geología más simple y más homogénea, las estaciones se ubicaron sobre la misma unidad litológica conformada por derrames de lava.

Aun así, los resultados de aplicar el método de Nakamura muestran comportamientos distintos para las estaciones del arreglo de CU (figuras 5.3 y 5.4), en la siguiente tabla se muestran los resultados para las cuatro estaciones del arreglo y un promedio general.

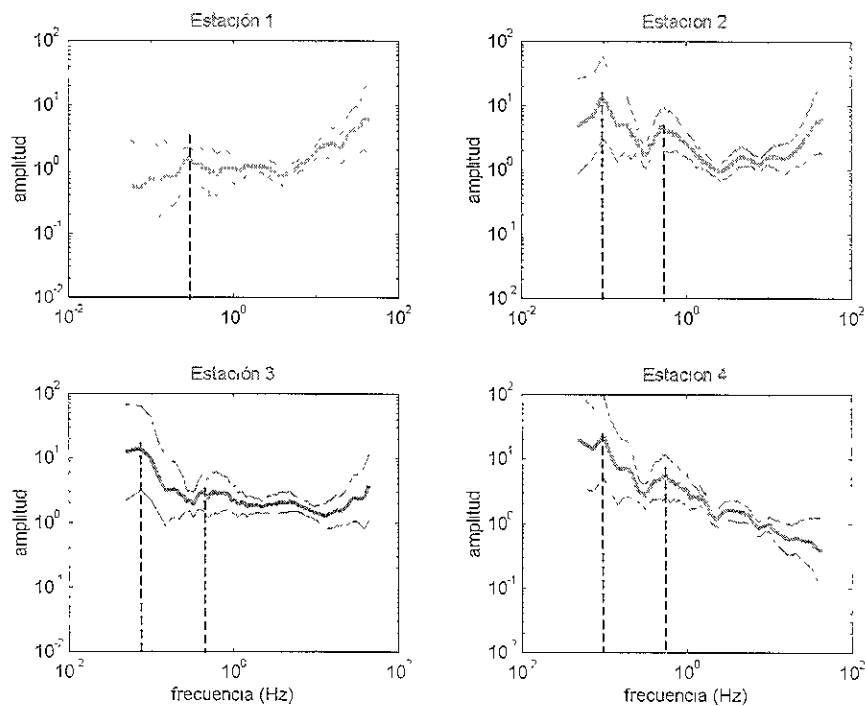


Figura 5.3. Cocientes por estación para el arreglo de CU.

| | Estación 1 | Estación 2 | Estación 3 | Estación 4 | Promedio |
|------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Frecuencia (Hz.) | 0.29 | 0.097, 0.51 | 0.07, 0.42 | 0.097, 0.56 | 0.097, 0.54 |
| Amplitud | 1.46 | 13.71, 4.83 | 14.17, 3.02 | 23.09, 5.58 | 6.87, 2.81 |

Tabla 5.1. Frecuencias dominantes de las cuatro estaciones, encontradas con el método de Nakamura.

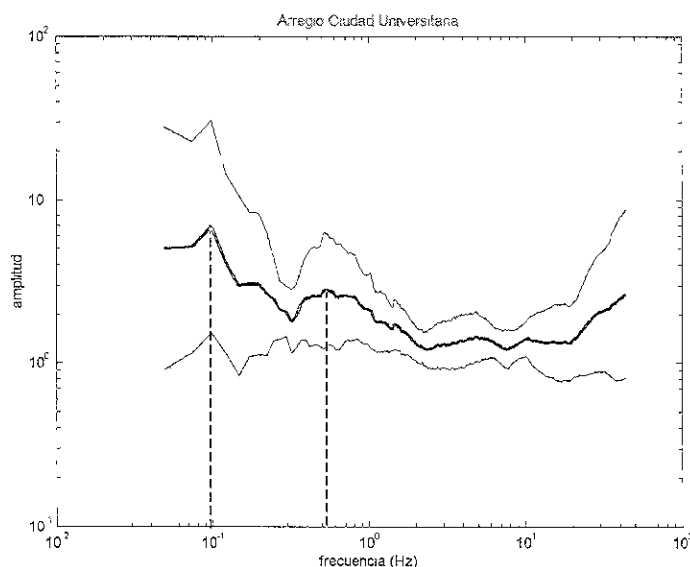


Figura 5.4. Promedio general del arreglo de CU.

En la tabla 5.1 se puede observar que existe una gran dispersión en cuanto a las estimaciones de la frecuencia fundamental del sitio, obtenidas a partir de la aplicación del método de Nakamura, y que este parámetro varía en un intervalo de 0.097 a 0.56 Hz.; de igual modo sucede con la amplitud, que varía de 1.46 a 23.09.

Por otro lado, Pacheco y Singh (1995) reportan una amplificación de 2.5 en un intervalo de 0.2 a 3 Hz. para CU a partir de datos de eventos sísmicos, sin embargo, señalan que el nivel de amplificación y el intervalo de frecuencias donde se encuentra la máxima amplificación varía según el origen de los eventos sísmicos.

Es claro que existe una gran dispersión en los resultados, tanto para las frecuencias calculadas, como para la amplificación que se obtiene de la aplicación del método de Nakamura.

Sin embargo, la aplicación del método SPAC a los registros de CU mostró resultados alentadores en cuanto a la aplicabilidad de esta técnica en zonas donde no existan grandes contrastes de impedancias, lo que ocasiona que los resultados del método de Nakamura presenten algunos problemas. Esto sugiere que el método SPAC puede utilizarse de manera complementaria a otras técnicas de análisis.

La aplicación de este método se describió en el capítulo IV, en el apartado 3. Como se mencionó en dicho capítulo, se seleccionaron las ventanas con mejores coeficientes de correlación y se obtuvo una curva de dispersión dentro del abanico de confiabilidad definido por la distancia entre estaciones. A partir de esta curva, se estimó un modelo de velocidades para CU (tabla 5.2).

Utilizando el método de Haskell-Thompson, se obtuvo la función de transferencia utilizando el modelo de ondas S y P que se muestra en la tabla 5.2, y que es el obtenido de

la aplicación del método SPAC a los registros de campo. Los valores de Q_S se obtuvieron de Singh *et al.* (1995), y según Lay y Wallace (1995), los valores de Q_P se pueden obtener con la relación.:

$$Q_P = \frac{9}{4} Q_S \quad (5.1)$$

| Espesor (m) | Densidad (t/m ³) | Velocidad Ondas P (m/seg) | Velocidad Ondas S (m/seg) | Q_P | Q_S |
|----------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------|-------|
| 116 | 2.0 | 1630 | 804 | 562 | 250 |
| 530 | 2.0 | 2500 | 1263 | 562 | 250 |
| 700 | 2.2 | 3100 | 1500 | 562 | 250 |
| 700 | 2.2 | 4500 | 2153 | 675 | 300 |
| ∞ | 2.5 | 5600 | 3000 | 5000 | 5000 |

Tabla 5.2. Modelo de velocidades para CU encontrado con el método SPAC.

Esta función de transferencia se compara con las obtenidas anteriormente:

- 1) a partir del modelo propuesto por Kagawa *et al.* (1996) que se muestra en la tabla 5.4 (figura 5.5),
- 2) del cociente espectral de la estación de CU y la estación de Estanzuela para el sismo del 15 de junio de 1999 en Tehuacan (Montalvo *et al.*, 2000) (figura 5.6),
- 3) a partir del modelo de velocidades propuesto por Gutiérrez *et al.* (1994) que se muestra en la tabla 5.3 (figura 5.6).

| Espesor (m) | Densidad (t/m ³) | Velocidad Ondas P (m/seg) | Velocidad Ondas S (m/seg) | Q_P | Q_S |
|----------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------|-------|
| 80 | 1.9 | 1000 | 430 | 280 | 140 |
| 50 | 2.0 | 2062 | 875 | 600 | 300 |
| ∞ | 1500.0 | 3100 | 1500 | 5000 | 5000 |

Tabla 5.3. Modelo de velocidades de CU propuesto por Gutiérrez *et al.* (1994) a partir de un estudio de refracción.

| Espesor (m) | Densidad (t/m ³) | Velocidad Ondas P (m/seg) | Velocidad Ondas S (m/seg) | Q _p | Q _s |
|----------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------|----------------|
| 15 | 1.8 | 1500 | 205 | 562 | 250 |
| 10 | 1.8 | 900 | 402 | 562 | 250 |
| 9 | 1.9 | 1250 | 506 | 562 | 250 |
| 10 | 1.9 | 1500 | 714 | 675 | 300 |
| 10 | 1.9 | 1400 | 432 | 675 | 300 |
| 116 | 2 | 1630 | 804 | 675 | 300 |
| 330 | 2 | 2500 | 1263 | 675 | 300 |
| 500 | 2.2 | 2900 | 1294 | 675 | 300 |
| 600 | 2.5 | 4500 | 2153 | 675 | 300 |
| ∞ | 2.5 | 5600 | 2841 | 5000 | 5000 |

Tabla 5.4. Modelo de velocidades de CU propuesto por Kagawa *et al.*(1996) con el método f-k.

En la figura 5.5 se muestran:

- las frecuencias fundamentales obtenidas de la aplicación del método de Nakamura, cruces para los valores obtenidos de la figura 5.3, y círculos para los valores de la figura 5.4,
- en línea discontinua, la función de transferencia del modelo de Kagawa *et al.* (1996),
- en línea continua, la función de transferencia del modelo obtenido con el método SPAC y,
- en línea vertical discontinua la frecuencia fundamental de CU reportada por Lermo y Chávez-García. (1994b).

Si consideramos los picos observados de los cocientes de Nakamura, en la figura 5.5 se muestra que las frecuencias fundamentales y los valores de amplificación encontrados no corresponden a ninguna de las funciones de transferencia que se muestran en la misma figura.

La función de transferencia del modelo de Kagawa *et al.* (1996) muestra amplitudes fuera de lo que se esperaría en una estación de zona de lomas, además las frecuencias de los picos más importantes se encuentran corridos hacia altas frecuencias.

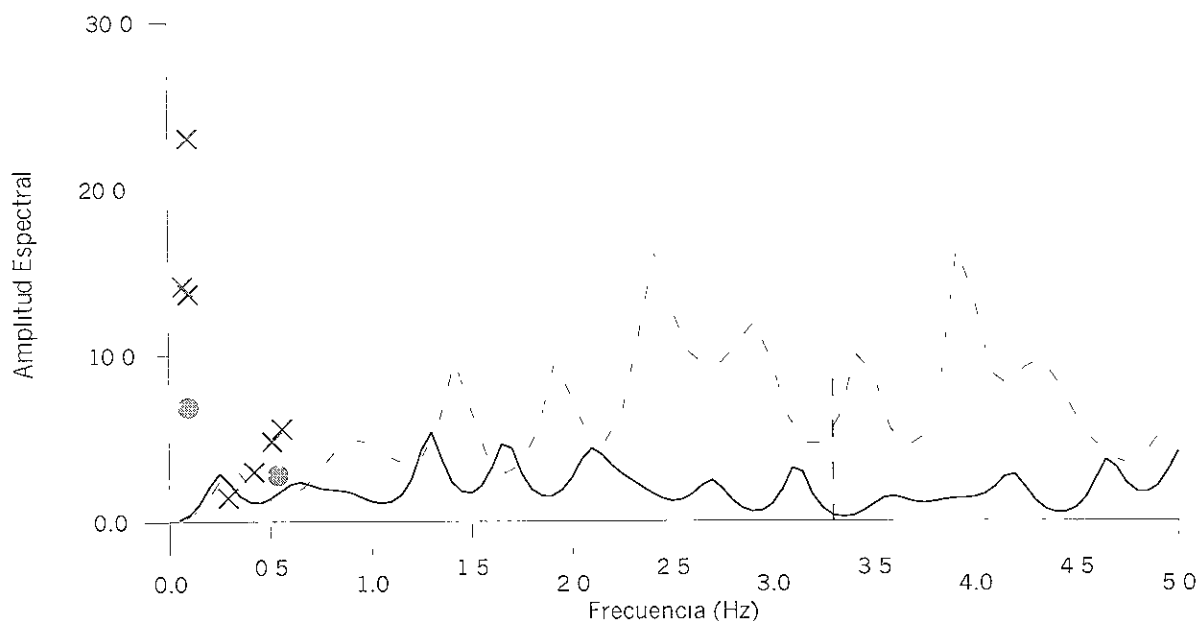


Figura 5.5. Comparación de la función de transferencia obtenida a partir del modelo encontrado con el método SPAC, con la función de transferencia del modelo propuesto por Kagawa *et al* (1996). Las cruces indican las frecuencias fundamentales encontradas con el método de Nakamura para cada estación, y los círculos las frecuencias del promedio general. La línea discontinua vertical indica la frecuencia fundamental reportada por Lermo y Chávez-García (1994b).

En la figura 5.6 se muestran tres curvas:

- en línea discontinua (curva suave), la función de transferencia obtenida del modelo de Gutiérrez *et al.* (1994), mostrado en la tabla 5.4,
- en línea vertical discontinua la frecuencia fundamental de CU reportada por Lermo *et al.* (1992).
- en línea discontinua, la función de transferencia empírica de Montalvo *et al.* (2000) y,
- en línea continua, la función de transferencia del modelo encontrado con el método SPAC.

De la comparación con la función de transferencia del modelo de Gutiérrez *et al.* (1994), se observa que, como era de esperarse, al definir más estratos con el modelo estimado con el método SPAC, se marcan más picos en la función de transferencia (figura 5.6).

Por otro lado, de la comparación con la función de transferencia empírica de Montalvo *et al.* (2000) (figura 5.6), se observa que la forma espectral es muy similar, varios picos coinciden en frecuencias (1.25, 1.75, 2.25 y 3.2 Hz.); sin embargo, en la amplitud espectral se observan algunas diferencias que pueden deberse a que la función de transferencia empírica obtenida por Montalvo *et al.* (2000) es relativa a la estación Estanzuela y no considera características más locales de cada sitio (frecuencias > 3.5 Hz.). Estos autores mencionan un claro efecto de sitio de 1 a 4 Hz., que también se observa en la función de transferencia calculada con el modelo encontrado con el método SPAC.

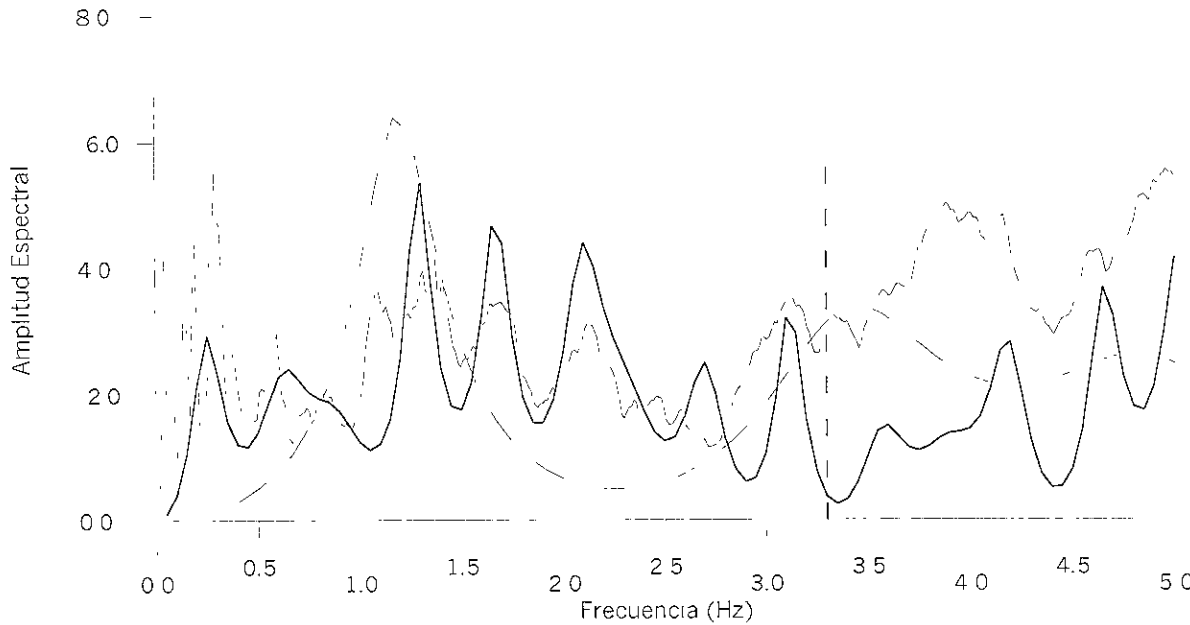


Figura 5.6. Comparación de la función de transferencia del modelo encontrado con el método SPAC, con la función de transferencia empírica de Montalvo *et al.* (2000) (línea discontinua) y, con la función de transferencia de Gutiérrez *et al.* (1994) (línea discontinua, curva suave). La línea vertical discontinua indica la frecuencia fundamental reportada por Lermo y Chávez-García (1994b) para CU.

V.2 Conclusiones

Debido al auge en el uso de registros de microtemores en la estimación del efecto de sitio, es necesario utilizar técnicas para su análisis con fundamentos matemáticos firmes, que en general son desplazadas por otras más simples que no siempre brindan la información requerida de manera confiable.

Para este trabajo se aplicaron los métodos SPAC y Nakamura a registros de arreglos instrumentales obtenidos en dos sitios de la Ciudad de México, con lo que se llegó a las siguientes conclusiones.

El método de Nakamura es una herramienta sencilla de usar, sin embargo, puede suavizar el efecto de sitio y presentar gran dispersión en sus resultados. Este método sólo funciona de manera óptima cuando existen contrastes de propiedades muy grandes.

Para los casos estudiados en este análisis se encontró que para aplicar el método de Nakamura es mejor:

- ❖ combinar el efecto de los componentes horizontales del movimiento, calculando la suma vectorial de éstos y,
- ❖ utilizar señales estacionarias que no estén afectadas por fuentes muy cercanas a los sensores.

Por su sencillez, este método brinda una herramienta de exploración general del efecto de sitio; sin embargo, debido a las restricciones mencionadas arriba, es recomendable que se combine con otros métodos que pueden proporcionar información sobre la estructura del sitio.

Para Tulyehualco, la frecuencia fundamental se estimó con el primer arreglo instrumental en 0.22 Hz, que coincide con la reportada por otros autores. Sin embargo, en el segundo arreglo, el método de Nakamura no proporcionó una buena estimación única de la frecuencia fundamental del sitio, debido a la distancia entre estaciones y a las distintas litologías dentro del arreglo instrumental, demostrando así que no es posible correlacionar la información en estaciones separadas 800 metros.

Para el caso de CU, tampoco fue posible estimar una frecuencia fundamental única atribuible a toda la zona utilizando el método de Nakamura. La frecuencia fundamental para las distintas estaciones se encuentra en un intervalo de 0.07 -0.56 Hz., que no coinciden con la frecuencia reportada por Lermo y Chávez-García (1994b) de 3.3 Hz.

Para el estudio en Tulyehualco no fue posible obtener un modelo de velocidades a partir de la aplicación del método SPAC, pero esto se debió más a la distancia tan corta entre estaciones y a que éstas se ubicaron en litologías distintas, que a deficiencias del método en sí.

Mediante el análisis de datos de microtemores usando el método SPAC se obtuvo un modelo de velocidades para CU, con el que se calculó la función de transferencia del sitio. Ésta se comparó con una función de transferencia empírica (Montalvo *et al.*, 2000) del mismo sitio, el comportamiento en el dominio de la frecuencia coincidió en varios picos y valles en el intervalo de 0.3 a 4 Hz.

De la función de transferencia calculada con el modelo encontrado por el método SPAC, el intervalo de amplificación para CU sería de 0.3 a 5 Hz., que está dentro del intervalo de amplificación reportado por algunos autores (Singh *et al.*, 1988b) para estaciones ubicadas en la zona de lomas de la Ciudad de México y con el reportado por Pacheco y Singh (1995) para CU.

Con la aplicación del método SPAC a registros de CU se obtuvo información sobre la respuesta de este sitio para un intervalo de frecuencias entre 0.1 y 4 Hz, y una estimación razonable de la amplificación. En cambio, los resultados de la aplicación del método de Nakamura no proporcionaron la frecuencia fundamental del sitio con claridad.

El método SPAC es una técnica con fundamentos matemáticos firmes que proporciona un modelo de velocidades confiable a partir del cual se puede estimar la función de transferencia del sitio, lo que genera una estimación del efecto del mismo más completa que la obtenida con el método de Nakamura.

Algunas de las ventajas del uso del método SPAC para la estimación del efecto de sitio, a partir de registros de microtemores son:

- ❖ la identificación de cambios laterales de la litología, como en el caso del segundo arreglo de Tulyehualco,
- ❖ que no requiere de la existencia de una estación de referencia como en otros métodos,
- ❖ que proporciona información sobre la estructura de velocidades del sitio con la que es posible estimar la respuesta para una banda de frecuencias en las que puede haber amplificación.
- ❖ que la amplificación estimada está dentro del intervalo observado por otros autores utilizando cocientes espectrales con datos de eventos sísmicos.

Con estas observaciones se mostró que el análisis de registros de microtemores utilizando el método SPAC es una alternativa eficiente, sencilla y de bajo costo para estimar el efecto de sitio, y que además es de gran utilidad para realizar y completar estudios de microzonificación.