

10. MICROTREPIDACIONES: APROXIMACIÓN AL ESTADO DEL ARTE

10.1 INTRODUCCIÓN

Las microtrepidaciones (§10.2) han sido estudiadas desde principio del siglo pasado. Omori (1908) fue el pionero al realizar estudios empleando un péndulo inclinado (en Udías & Mezcua, 1996,13), y concluyendo que existían vibraciones naturales en el suelo, que no correspondían a vibraciones sísmicas o pulsaciones oscilatorias, las cuales podían ser causadas por viento, ondas o perturbaciones artificiales como el tráfico y maquinaria (en Meneses, 1991).

A raíz del sismo del 18 de mayo de 1940 en California, EEUU, se empezaron a desarrollar estudios dinámicos del suelo que incluyeron la observación de las microtrepidaciones (Meneses, 1991).

Es así como a partir de 1950 aparecen investigaciones y metodologías lideradas por los japoneses sobre la utilización de las microtrepidaciones para el estudio de las propiedades dinámicas del suelo. La primera metodología de análisis fue propuesta en 1954 por Kanai (1954). Posteriormente Aki (1957) y Kagami *et al* (1982) entre otros, han realizado investigaciones alrededor de la naturaleza de las microtrepidaciones y han desarrollado o mejorado metodologías para su uso. Recientemente Nakamura (1989) y Konno (1996) han propuesto metodologías novedosas y realizado diversos ensayos de campo para su evaluación. La

metodología de Nakamura se ha difundido ampliamente en todo el mundo y ha sido aplicada como parte de muchos estudios de microzonificación sísmica, por dos razones, a saber: no requiere de mayores inversiones ya que sólo utiliza una estación, y no requiere la generación artificial de ondas o la espera de sismos.

Este capítulo, que corresponde a una revisión bibliográfica sobre las microtrepidaciones, busca documentar el estado del arte en términos de la naturaleza, metodologías de análisis y resultados de aplicación. No pretende de ninguna manera entrar en discusiones teóricas sobre la naturaleza de las microtrepidaciones, ni sobre los métodos de análisis, pero si busca hacer una evaluación crítica de los resultados obtenidos por otros, con el fin de identificar la metodología mas apropiada para el proyecto.

10.2 DEFINICIÓN

Según Lay & Wallace (1995) las fuentes primarias de ondas sísmicas han sido clasificadas en tres tipos: internas, externas y mixtas. Las fuentes más comunes, que involucran procesos de interés relacionados con las ciencias de la tierra, se listan en la Tabla 15.

Tabla 15. Fuentes primarias de ondas sísmicas.

<i>Internas</i>	<i>Externas</i>	<i>Mixtas</i>
Fallas sísmicas	Vientos, presión atmosférica	Erupciones volcánicas
Explosiones internas	Oleaje y mareas	Deslizamientos
Flujo hidrológico	Ruido cultural (tráfico, trenes)	Avalanchas
Movimientos del magma	Impacto de meteoritos	
Explotación minera subterránea	Explotación minera superficial	
	Lanzamiento de cohetes	
	Aterrizaje y decolaje de aviones	

Con modificaciones a partir de Lay & Wallace (1995)

La diversidad de fuentes mostradas en la tabla anterior sugiere que tanto los depósitos de suelo como las rocas están sujetos permanentemente a vibraciones.

Dichas vibraciones pueden clasificarse en: (1) naturales: inducidas por cambios de presión atmosférica, tormentas, oleaje y, (2) artificiales: generadas por plantas de energía, voladuras en canteras, tráfico automotor, trenes, etc. Las primeras de periodos relativamente largos - entre 2 y 3 segundos - son conocidas como microsismos¹⁸, mientras que las segundas que generan ondas de periodo corto han sido llamadas microtrepidaciones (Nakamura, 1989).

En este sentido las vibraciones aleatorias inducidas a las masas de suelo y roca son conocidas como microtrepidaciones. Éstas fueron definidas por Lermo y Chávez-García (1994) como ambientes sísmicos ruidosos. Kanai y Tanaka (1961) las definieron como vibraciones de suelo con amplitudes entre 0,1 y 1 micrones y con periodos entre 0,05 y 2 segundos, causados por eventos artificiales como el tráfico, maquinaria industrial y otros.

El término microtrepidaciones corresponde a una traducción del inglés de *microtremor* pero también son conocidas como vibraciones ambientales; algunos autores (p. ej. Giraldo *et al*, 1999) usan el término microtemblores. En este trabajo se utilizará el término microtrepidaciones.

10.3 NATURALEZA DE LAS MICROTREPIDACIONES

La naturaleza de las microtrepidaciones ha sido objeto de algunas investigaciones teóricas – no tantas como investigaciones aplicadas – que han incluido el desarrollo de diversas mediciones de campo para investigar los tipos

¹⁸ Los microsismos se definen como ondas sísmicas débiles registradas en forma casi constante por los sismógrafos; representan el “ruido” de la Tierra causado por las olas, el viento, las vibraciones mecánicas y en general por la actividad humana (p. ej. Sauter, 1991).

de ondas que las componen y simulaciones numéricas de propagación del ruido en modelos geológicos simplificados. Aún no hay un consenso al respecto, se ha considerado que las microtrepidaciones están compuestas por ondas internas y ondas superficiales; o que están compuestas principalmente por ondas de superficie dispersas; o que están compuestas por ondas Rayleigh.

Aki (1957) analizó las microtrepidaciones estadísticamente en el espacio y en el tiempo como ondas estocásticas estacionarias y las consideró como ondas de superficie dispersas. Akamatsu (1961) y Nogoshi e Igarashi (1970, 1971) también consideraron que las microtrepidaciones se componen principalmente de ondas superficiales.

Kanai y Tanaka (1961) consideraron que las amplificaciones de las microtrepidaciones en capas del subsuelo se deben a múltiples reflexiones de ondas S incidentes verticalmente, en forma similar a los movimientos fuertes.

Después de detallados estudios de microsismos Allam (1967) concluyó que las microtrepidaciones podrían ser explicadas como ondas Love y Rayleigh en los sitios donde las interfaces entre los estratos de suelo están claramente definidas.

Udwadia y Trifunac (1973) mostraron la existencia de movimiento vertical en las microtrepidaciones que puede ser explicado por la multireflexión de las ondas SH en las capas de subsuelo. Sin embargo Udwadia y Trifunac (1974) mostraron la posible aplicabilidad de las microtrepidaciones en un área donde se encuentra resonancia fuerte durante movimientos sísmicos (según Giraldo *et al*, 1999).

Con base en mediciones de campo y análisis de dispersión de velocidades Horike (1985) postuló que las microtrepidaciones verticales consisten de ondas Rayleigh.

Nakamura (1989, 2000), basado en que las fuentes artificiales de vibración tienen principalmente movimiento vertical, consideró que las microtrepidaciones están compuestas por diferentes tipos de ondas que incluye tanto ondas de superficie como ondas internas, y que el efecto de las ondas Rayleigh aparece en las componentes H y V de las microtrepidaciones, pero más acentuado en la componente V. Esto fue confirmado por simulaciones numéricas de Lermo & Chavez-Garcia (1994) y Lachet & Bard (1994) que establecieron que las microtrepidaciones consisten de ondas Rayleigh propagándose en un semiespacio de una sola capa. Por su parte las simulaciones realizadas por Wakamatsu & Yasui (1995) encontraron que en las microtrepidaciones predominaban las ondas Rayleigh y Love.

Toshinawa *et al* (1994) anotaron que los problemas entre la teoría y la práctica en relación con el estudio de las microtrepidaciones se debe a que las ondas inducidas provienen de muchas clases de fuentes desconocidas.

Ohmachi & Umezono (1998) encontraron que la proporción de ondas Rayleigh en las microtrepidaciones varía entre el 10 y el 90% entre diferentes lugares según la hora del día, y que la proporción mas frecuente es 40%. Según esto determinaron que el análisis de microtrepidaciones debe incluir, adicionalmente, un estudio del porcentaje de ondas R al momento de medición.

10.4 METODOLOGÍAS PARA LA MEDICIÓN DEL EFECTO DE SITIO

La primera metodología propuesta para el estudio y uso de las microtrepidaciones fue la de Kanai y Tanaka en 1954 y posteriormente la de Aki (1957). Estas metodologías y otras posteriores contemplaban la lectura sobre el papel de los periodos de las ondas registradas y el uso de ábacos. Estas metodologías son descritas en el § 10.4.1.

Recientemente se han desarrollado, aplicado y probado metodologías para el análisis de las microtrepidaciones que buscan la determinación de parámetros

dinámicos de los suelos; entre los mas investigadas están el periodo fundamental del suelo y su factor de amplificación, y otros menos explorados han sido la profundidad a basamento y las velocidades de la onda S.

Estas metodologías se pueden clasificar en tres según el número de estaciones de observación involucradas en los análisis: Método 1. Observación con arreglos de sensores y registro simultáneo. Método 2. Observación con una estación de referencia en roca. Método 3. Observaciones con una sola estación (usando una componente o tres componentes del movimiento). Las diferentes metodologías según estas tres categorías se describen en § 10.4.2, 10.4.3 y 10.4.4 respectivamente.

10.4.1 Antecedentes, metodología de Kanai y estudios posteriores.

La metodología propuesta (Kanai & Tanaka, 1954) podía ser aplicada sin la necesidad de computadoras, y consistía de la construcción de curvas de distribución de periodos determinados según el método de *Zero crossing* a partir de registros de vibración ambientales tomados con un sensor horizontal:

Zero crossing. Para determinar periodos directamente de los registros medidos. Se mide la duración entre dos puntos adyacentes que cruzan la línea cero, ya que esa cantidad medida corresponde a la mitad del periodo, luego se multiplica por un factor de 2.

Curva de distribución. Con base en los periodos obtenidos por el método de *Zero crossing*, se elabora un histograma del número de ocurrencias para cada intervalo de valores de periodo.

A partir de la curva de distribución Kanai & Tanaka (1954) propusieron dos métodos para clasificar los suelos con el empleo de dos ábacos: uno donde se relacionan los periodos promedio con los periodos mayores en segundos y el otro, que relaciona periodo predominante, en segundos, con las amplitudes

mayores, en micrones. Ambos permitían clasificar los suelos en 4 categorías según la siguiente tabla:

Tabla 16. Clasificación de los suelos según la metodología de Kanai (1954)

Tipo de suelo	Descripción
I	Roca, grava arenosa dura, suelos duros del terciario o más antiguos.
II	Grava arenosa, arcilla dura arenosa, suelo diluvial o aluvial gravoso con espesor de 5 m o más
III	Suelo aluvial con espesor de 5 m o mas.
IV	Suelo aluvial de depósitos blandos, lodo o semejante con profundidad de 30 metros o más, terrenos recuperados de pantanos etc.

Kanai y Tanaka (1961) compararon los resultados de periodos predominantes a partir del registro de microtrepidaciones y movimiento sísmico fuerte, concluyendo que el periodo predominante de un movimiento sísmico está bastante relacionado con el periodo mas frecuente de las microtrepidaciones, y que también en los lugares en los que la curva de distribución de las microtrepidaciones tiene un solo pico, dicho periodo coincide claramente con el periodo predominante de los movimientos sísmicos. Por otro lado, si se presentan mas de dos picos, éstos son identificados por la curva de distribución de las microtrepidaciones (según Giraldo *et al*, 1999).

Kanai y Tanaka (1961) llevaron a cabo observaciones simultáneas de microtrepidaciones a diferentes profundidades en perforaciones en varios tipos de suelos y concluyeron que:

- la distribución de periodos varia con la profundidad,
- la variación de la distribución de amplitudes con la profundidad no es simple ni formulable,
- el registro de microtrepidaciones en superficie permite obtener el periodo de resonancia que se obtiene con el sismo.

Las condiciones mínimas para que se presente una vibración predominante del terreno establecidas por Kanai (1957) se enuncian a continuación:

- (1) cuando el suelo está formado por un sólo estrato la respuesta espectral del suelo tiene un solo pico predominante;
- (2) en el caso de capas múltiples estratificadas la respuesta espectral de las amplitudes en superficie es muy irregular y el valor del pico no es tan grande como en el caso de un único estrato;
- (3) en algunas circunstancias particulares, cuando todas las ondas reflejadas en cada interface que arriban a la superficie libre están en la misma fase, la amplitud superficial crece a un valor extremadamente alto;
- (4) es probable que amplitudes de vibración muy grandes aparezcan en superficie, aún si un medio rígido existe en el estrato superficial o en uno intermedio;
- (5) en muchos casos, el periodo predominante de vibración coincide con el periodo natural del estrato mas alto;
- (6) la discriminación de un buen o mal suelo desde el punto de vista vibracional, a veces difiere de aquél considerado estáticamente, es decir, considerando solo la capacidad portante del suelo (en Meneses, 1991).

Estudios posteriores de Kanai y Tanaka (1961) indicaron: (1) que la amplitud de los registros de microtrepidaciones obtenidas durante el día eran entre 2 y 10 veces más grandes que aquéllas obtenidas durante la noche, lo que muestra que las amplitudes de las microtrepidaciones son fuertemente dependientes de las fuentes de vibración artificial alrededor del punto de medición; y (2) que los periodos no varían sustancialmente con el tiempo y dependen mayormente de las propiedades dinámicas del suelo (en Meneses, 1991).

Adicionalmente Kanai y Tanaka (1961) efectuaron mediciones de las microtrepidaciones en superficie y a diferentes profundidades, encontrando que la relación de las curvas de distribución de periodos obtenidas en la superficie del terreno y a diversas profundidades mantenía los rangos de periodos

predominantes obtenidos en cada una de las respectivas curvas por separado. Asimismo que la curva de relación de amplitudes estaba en buena concordancia con el espectro de amplificación teórico para dicho sitio, obtenido a partir de análisis del perfil del suelo (en Meneses, 1991).

10.4.2 Método 1: Observación con arreglos de sensores.

La observación de las microtrepidaciones a través de arreglos - *arrays* - de geófonos ha sido desarrollada para conocer la estructura del subsuelo y la naturaleza de la propagación de las microtrepidaciones. Los trabajos pioneros fueron los de Aki (1957), Toksöz (1964) y Lacoss *et al* (1969).

Esta metodología consiste en la instalación de varios sensores tanto en depósitos como en roca, lo cual supone que en los análisis se pueden eliminar los efectos de fuente y de trayectoria.

Horike (1985) realizó observaciones de microtrepidaciones usando un arreglo de sismómetros verticales y obtuvo la dispersión de la velocidad de fase por análisis frecuencia-número de onda. Con el método de la inversión generalizada determinó la estructura de las ondas S usando las dispersiones de la velocidad de fase **postulando que las microtrepidaciones verticales consisten de ondas Rayleigh**. De esta manera obtuvo modelos de la estructura en dos sitios coincidiendo bien con los obtenidos por otros parámetros geotécnicos medidos *in situ*. En su análisis usó el rango de las frecuencias entre 0,5 y 2,5 Hz y los modelos de estructura fueron determinados desde la superficie a profundidades de varios cientos de metros (en Giraldo *et al*, 1999).

Matsushima y Okada (1990) aplicaron un método similar para determinar la estructura profunda en el Valle de Hokkaido, Japón y obtuvieron una buena correlación con los datos de gravimetría. Esta técnica ha sido aplicada con microtrepidaciones de alta frecuencia en estructuras superficiales (ej. Sato *et al*, 1991; Tokimatsu *et al* 1994).

Horike (1993) resumió las ventajas de este método de la siguiente forma:

1. Se determina bien la velocidad de fase de ondas superficiales por el método frecuencia/número de onda, por una clara separación de las ondas internas.
2. Se determina bien un modelo de estructura profunda de velocidad de ondas S, mejor que con otros estudios geotécnicos convencionales.
3. Este método es aplicable igualmente en áreas urbanas donde otras mediciones geotécnicas son difíciles de llevar a cabo.
4. Se deben incluir consideraciones adicionales para aplicar este método a una estructura subterránea irregular.

Sin embargo, en el valle de Ciudad de México Kagawa *et al* (1996) utilizaron arreglos de 7 sensores de velocidad (de 2 y 7 s de periodo) y sistemas de registro simultáneo, en tres sitios diferentes para la estimación de la profundidad y estructura de los sedimentos (velocidad de onda S). Las características de dispersión de las velocidades de fase se derivaron de los arreglos de datos en cada sitio. Diferentes dispersiones fueron obtenidas para los tres sitios y se encontraron claras características de la dispersión de las ondas R, las que fueron usadas para determinar la profundidad de la estructura sedimentaria. Los resultados obtenidos aplicando esta técnica fueron contradictorios con la geología existente: un sitio donde los datos de anomalía gravimétrica y perforaciones lo definen como una estructura sedimentaria profunda fue clasificado como zona montañosa; un sitio considerado como zona lagunar fue clasificado como conformado por capas sedimentarias suaves y delgadas y, por último, un sitio conocido por sus condiciones rocosas, fue clasificado como una zona montañosa.

10.4.3 Método 2: Relación espectral con un sitio de referencia.

De igual forma que se hace con los movimientos fuertes y débiles, esta metodología busca compensar los efectos de fuente y trayectoria. Esta

comparación supone que las ondas sísmicas no sufren los efectos de amplificación en roca o que éstas pueden ser despreciables.

Esta metodología requiere de un sitio de referencia óptimo en cercanías de la ciudad (o en cercanías del sitio de medición).

El procedimiento más común, introducido por Borchardt (1970), es dividir el espectro observado en el sitio en cuestión por el espectro en un sitio de referencia. Si los dos sitios tienen efectos similares de fuente y trayectoria y, en el sitio de referencia hay una respuesta de sitio despreciable, el cociente espectral resultante corresponde a una estimación del efecto de sitio.

Como Aki (1988) indicó, no es fácil compensar el factor de la fuente, porque en un área urbana las fuentes de microtrepidaciones de alta frecuencia (> 1 Hz) generalmente están distribuidas por todas partes. En cambio las fuentes de microtrepidaciones de baja frecuencia (< 1 Hz) de microtrepidaciones - o microsismos - han sido interpretadas como olas oceánicas y tienen menor variabilidad espacial.

Otañ *et al* (1978) encontraron que los cambios sistemáticos de frecuencia del pico están asociados con el espesor de la roca firme. En cambio Kagami *et al* (1982) no encontraron frecuencias dominantes claras pero sí importantes correlaciones entre las amplitudes espectrales y el espesor de valles sedimentarios.

El método de la relación espectral fue aplicado con éxito en Flushing Meadows, Nueva York, por Field *et al* (1990) y en el área de Bahía de San Francisco por Akamatsu *et al* (1991), Dravinski *et al* (1991) y Seo *et al* (1991).

Seo (1992) y Gutiérrez & Singh (1992) encontraron diferencias entre las amplitudes de las relaciones espectrales calculadas a partir de registros de

movimiento fuerte y de microtrepidaciones.

10.4.4 Método 3: Observaciones con un sólo sensor (1 ó 3 componentes).

En términos de costos este es el más barato de los tres métodos, no sólo por que sólo usa un sensor (de tres componentes), sino por que no requiere un sitio de referencia, que a veces puede no existir en cercanías de entornos urbanos sobre llanuras sedimentarias (p. ej. New Madrid, Field & Jacob (1995); y área de Yun-Chia-Nan, Huang & Wu (1998)). Este es el caso de ciudades como Palmira y Candelaria en el Valle del Cauca.

Nakamura (1989) introdujo una metodología novedosa basada en que la relación espectral entre las componentes horizontales y la vertical, registradas en un mismo sitio, podían considerarse como la función de transferencia del suelo. Como se verá mas adelante, esta función de transferencia está relacionada con la función de transferencia de las ondas SH. Konno (1996) y Ohmachi & Umezono (1998) con base en argumentación teórica sobre la naturaleza de las microtrepidaciones han presentado una modificación a la metodología de Nakamura, basados en argumentación teórica sobre la influencia de las ondas R en las microtrepidaciones y, en especial, en el cociente espectral H/V. Por su parte Arai & Tokimatsu (1998) han considerado que las microtrepidaciones se componen tanto de ondas R como L, por lo que propusieron una relación espectral diferente a la de Nakamura.

Tokeshi *et al* (1996) propusieron una metodología que usa las componentes horizontales de las microtrepidaciones. Proponen que en las curvas de espectros de fases (de las dos componentes horizontales de un lado del autocorrelograma), el punto de intersección donde la frecuencia mas baja (de la curva) cruza el eje de las frecuencias (abscisas) puede ser usado para estimar la frecuencia fundamental de resonancia de las ondas SH. Sus resultados muestran una coincidencia con la frecuencia fundamental de resonancia de las ondas SH.

La metodología de Nakamura es descrita en detalle en el siguiente numeral debido a que ha sido la más aplicada actualmente en el mundo; ha sido objeto de numerosas investigaciones y por ende seleccionada en este proyecto. De igual manera, como ha ocurrido con otros métodos empíricos que encuentran acogida por alguna razón (alguna ventaja), la metodología de Nakamura se ha difundido ampliamente por lo que se ha ido “madurando” con el tiempo a través del uso y examen de muchos otros.

Adicionalmente la metodología de Konno (1996) es descrita más adelante.

10.5 METODOLOGÍA DE NAKAMURA

10.5.1 Descripción.

La metodología de Nakamura (1989) está basada en la suposición que el cociente espectral entre las componente horizontal y vertical de las microtrepidaciones es un aproximación de la función de transferencia de los suelos. Para llegar a ésto Nakamura se basó a su vez en las siguientes suposiciones:

1. Las microtrepidaciones se propagan principalmente como trenes de onda Rayleigh.
2. El efecto de las ondas Rayleigh es igual para las componentes horizontales y verticales en superficie.
3. El ruido artificial se propaga principalmente como ondas Rayleigh.
4. Las componentes vertical y horizontal de las microtrepidaciones (en su origen) se consideran similares.
5. Éstas microtrepidaciones son amplificadas por las capas superficiales blandas de suelo acumuladas sobre un sustrato duro.

6. Se puede considerar que la componente horizontal de las microtrepidaciones es amplificada por la multireflexión de la onda S y la componente vertical por multireflexión de la onda P.
7. La componente vertical de las microtrepidaciones no es amplificada por las capas horizontales.

La metodología propuesta buscó básicamente eliminar el efecto de las ondas Rayleigh para describir la función de transferencia en función de las ondas internas.

Usualmente la función de transferencia S_T , de la capas superficiales ha sido definida como la relación entre el espectro horizontal de las microtrepidaciones en superficie S_{HS} y en el sustrato S_{HB} así:

$$S_T = S_{HS}/S_{HB}$$

Como S_{HS} es afectada por las ondas superficiales, y como las ondas de las microtrepidaciones se propagan principalmente como ondas Rayleigh, S_{HS} podría estar afectado por este tipo de ondas. De tal manera que el efecto de las ondas Rayleigh debería ser incluido en la componente vertical de las microtrepidaciones en superficie pero no en la componente vertical en basamento. Asumiendo que la componente vertical de las microtrepidaciones no es amplificada por las capas superficiales, se puede definir el efecto de las ondas Rayleigh (E_S) en esta componente así:

$$E_S = E_{VS}/E_{VB}$$

De modo que si no hay ondas Rayleigh $E_S = 1$ y, será mas grande, si el efecto de las ondas R se incrementa.

Asumiendo que el efecto de las ondas R es igual para las tres componentes (horizontales y vertical) en basamento, entonces $S_{TT} = S_T/E_S$, obteniendo que:

$$S_{TT} = S_T/E_S = R_S/R_B$$

Donde $R_S = S_{HS}/S_{VS}$ y $R_B = S_{HB}/S_{VB}$

R_S y R_B fueron obtenidos al dividir los espectros horizontales entre los verticales en superficie (R_S) y basamento (R_B). Según mediciones realizadas por Nakamura en basamento, la relación R_B es aproximadamente 1 para un amplio rango de frecuencias en sitios donde existe un sustrato firme. Es decir, por lo que la propagación es aproximadamente igual en todas las direcciones, se puede concluir que:

$$S_{TT} \cong R_S$$

Esto significa que la función de transferencia de capas superficiales puede ser estimada solamente con las microtrepidaciones en superficie. En otras palabras, la componente vertical del movimiento de microtrepidaciones mantiene las características de la componente horizontal en basamento.

R_B debe estar libre del efecto de ondas Rayleigh y tener características relativas al sitio, por lo que una estimación más confiable de la relación S_{TT} se produciría al multiplicarla por $1/R_B$ como término de compensación si existe información de las microtrepidaciones en basamento.

La metodología con base en el cociente espectral H/V es llamado por Nakamura (2000) como Técnica QTS, *Quasi Transfer Spectrum*.

10.5.2 Resultados de Nakamura.

Nakamura (1989) realizó mediciones continuas de las microtrepidaciones por mas de 30 horas. Los sitios de registro estaban ubicados en subestaciones del tren en Kanomoniya y Tabata. Para entender las características dinámicas de la estructura de suelo se hicieron mediciones en superficie y en el fondo de la estructura de suelo. Se utilizó un sensor de velocidad de periodo de un (1) s.

Los resultados de comparación en los dos sitios, entre S_{TT} y R_S mostraron que:

1. En Kamonomiya S_{TT} y R_S coinciden tanto en el pico predominante como en la forma entera de las relaciones espectrales.
2. En Tabata S_{TT} y R_S mostraron ser casi similares.
3. La función de transferencia R_S no es afectada por las vibraciones inducidas por la operación de los trenes
4. La amplificación máxima de la velocidad puede ser estimada de manera aproximada usando la máxima amplitud de R_S .

Adicionalmente se aplicó la relación R_S a registros de sismos fuertes en roca y en suelos en la Ciudad de México (Nakamura, 1989), encontrando que R_S también puede ser aplicada usando señales de sismos.

10.5.3 Fundamentos de la técnica del cociente espectral H/V.

Según Nakamura (1989), ratificado en Nakamura (2000), la relación espectral H/V de las microtrepidaciones está controlada por las ondas SH y no incluye los efectos de las ondas R presentes en la microtrepidaciones.

Pero algunas investigaciones teóricas y numéricas han indicado que la relación espectral H/V está controlada por la curva de polarización de las ondas R (Lachet & Bard, 1994; Lermo y Chavez-García, 1994; Konno, 1996). Nakamura

(1989) dice que justamente la relación espectral H/V fue formulada para remover el efecto de las ondas R.

10.5.4 Aplicaciones y estudios teóricos y numéricos.

La metodología de Nakamura (1989) ha sido cuestionada por algunos investigadores que no han llegado a resultados exitosos; otros no la encuentran factible porque consideran que tiene vacíos teóricos, mientras que otros – la gran mayoría - han tenido resultados exitosos, según comparación con resultados a partir de análisis teóricos y de registros de movimiento fuerte. Otros autores consideran que la metodología sólo es aplicable para limitadas condiciones geológicas, aquellas en las cuales las capas de sedimentos son planas, o cuando se está alejado de posibles efectos topográficos; y mientras que unos han encontrado que es aplicable en los extremos de cuencas sedimentarias, otros consideran que es aplicable en los centros de éstas.

La metodología de Nakamura ha sido objeto de múltiples investigaciones teóricas, aplicadas y de simulaciones numéricas. Sus resultados han sido comparados con los de otras técnicas de estimación de parámetros del efecto de sitio, por ejemplo aquellos basados en el registro de movimiento sísmico fuerte, y ha sido utilizada como parte de múltiples microzonificaciones alrededor del mundo.

Estos estudios y aplicaciones muestran que la metodología permite diferenciar zonas en contextos urbanos según características geotécnicas, dinámicas y geológicas similares. Ha sido usada para la determinación de los periodos fundamentales de vibración, factor de amplificación de este periodo, estimación del espesor de los sedimentos, y perfil de velocidades de la onda S. Adicionalmente ha servido para la realización preliminar de microzonificaciones sísmicas de manera rápida, para la realización de microzonificaciones

cuantitativas¹⁹. Puede ser usada, además para la selección de sitios para la localización de acelerógrafos.

A continuación se presentan una selección y síntesis de diversas investigaciones con base en el método Nakamura.

Finn (1991) reportó que la técnica de Nakamura (1989) está basada en suposiciones débiles y que requiere comprobación de campo.

Otro estudio (Lermo & Chávez-García, 1994) comparó resultados de tres (3) técnicas, dos con una sola estación y la otra utiliza con una estación adicional de referencia. Las técnicas son: (1) interpretación directa de la amplitud del espectro de Fourier o de la función de densidad espectral²⁰; (2) cálculo de relaciones espectrales en suelo respecto a una estación en roca; (3) técnica de Nakamura, concluyendo que **hay una correlación significativa entre los resultados de la técnica de Nakamura y la función de transferencia teórica en una dimensión (1D)**, lo cual explica que diferentes investigadores han podido caracterizar exitosamente en 1D los efectos de sitios sin importar que fueran consideradas como ondas superficiales o de cuerpo y que los resultados teóricos soportan la idea que la técnica de Nakamura no es afectada por el tipo de fuente.

Se han realizado simulaciones numéricas para investigar la influencia de diversos parámetros en la relación espectral de Nakamura, y se compararon los resultados calculados a partir de modelos teóricos con aquéllos de mediciones de campo. Lachet & Bard (1994) concluyeron que la relación espectral H/V obtenida a partir de la simulación del ruido muestra un pico cuya posición es independiente de la función de excitación de la fuente; que las relaciones espectrales H/V obtenidas de ondas SV incidiendo oblicuamente muestran

¹⁹ Acopio y análisis de información geológica, geotécnica, de parámetros elásticos y geofísicos en conjunto con mapas de isoperiodos a partir del registro y análisis de microtrepidaciones.

²⁰ En inglés *Power Density Function*

muchos picos cuya posición es independiente del ángulo de incidencia, y cuya frecuencia fundamental corresponde con la posición de la máxima amplitud, o amplitud pico, de H/V obtenida a partir de la simulación de ruido; que la forma de la relación H/V está fuertemente controlada por la curva de polarización de las ondas Rayleigh y que hay una gran correlación entre la posición del pico H/V derivada de la simulación del ruido con los obtenidos de las ondas verticales S. Esto indica que la relación espectral H/V es una estimación **confiable de la frecuencia de resonancia de una estructura de capas horizontales**. En contraste, la amplitud del pico H/V no solamente mostró una sensibilidad alta a la velocidad, sino también a parámetros como la relación de *Poisson* de una estructura sedimentaria y la distancia receptor-fuente. Su uso en la determinación de la amplificación del movimiento horizontal para ondas S incidentes, parece aún prematuro desde un punto de vista teórico. Finalmente anotaron que es importante considerar los límites de la aplicación del método de H/V en el caso de frecuencias de resonancias muy bajas que corresponden a estructuras sedimentarias muy gruesas ($f_0 < 0.5$ Hz), por lo cual plantearon la siguiente pregunta: ¿Son las fuentes superficiales como el ruido, capaces de excitar la estructura a bajas frecuencias?

Por su parte Wakamatsu y Yasui (1995) usaron modelos de estructura simples, encontrando que en las microtrepidaciones simuladas predominan las ondas R y L, y que la función de transferencia tiene una buena correlación con la función de transferencia unidimensional de las ondas.

Con respecto a los factores de amplificación, Nakamura *et al* (1994) propusieron que si la relación espectral es menor que 1 sobre un área muy grande, podría corresponder a un área con potencial de licuación. A partir de la relación espectral H/V construyeron una ecuación para estimar el riesgo por licuación.

Según Kudo (1995) se puede decir que existen problemas menos significativos para encontrar la frecuencia resonante del modo fundamental en un sitio a partir

de H/V, sin tener en cuenta el tipo de onda que componen las microtrepidaciones. (en Giraldo *et al*, 1999), sin embargo argumenta que las microtrepidaciones no puede ser expresadas como una convolución de ondas internas y superficiales sino que son generalmente una suma de ondas internas y superficiales, de ahí que el cociente de Nakamura no genera ninguna compensación de ondas Rayleigh (según suposición de Nakamura, 1989), y que la relación espectral H/V de las microtrepidaciones en basamento, que Nakamura (1989) asume aproximadamente igual a uno, es válida únicamente si en las microtrepidaciones predominaran las ondas Rayleigh y su elipticidad fuera casi unitaria.

Field & Jacob (1995) compararon los resultados de la clásica relación entre respuesta en roca y en sedimentos con tres técnicas de estimación de respuesta de sitio que no requieren estación de referencia. Los métodos de comparación fueron: (1) inversión de efectos por fuente y trayectoria , (2) relación espectral H/V con registros de sismos y (3) relación de Nakamura con registros de microtrepidaciones. Las tres técnicas evaluadas, que no dependen de un sitio de referencia, revelaron información útil para la estimación de la respuesta de sitio en diferentes partes de East Bay (California), concluyendo que Nakamura fue exitosa para identificar la frecuencia fundamental de resonancia del suelo.

Alva *et al* (1996) y Huamán (1991) compararon los periodos predominantes obtenidos de mediciones de microtrepidaciones en superficie y el periodo predominante calculado a partir de análisis de amplificación dinámica a deformaciones pequeñas, encontrando una buena correspondencia entre dichos valores.

Otra investigación (Dravinski & Wen, 1996) comparó dos técnicas de estimación del movimiento del terreno: la relación entre sedimento y basamento de Kagami (1982, 1986) y la de Nakamura (1989). Ambos fueron analizados en cuencas sedimentarias profundas de dos (forma semi-circular) y tres dimensiones (forma

semi-esférica). A su vez, fueron comparados con las frecuencias de resonancia teóricas; los resultados mostraron similitud para los dos tipos de cuencas: los valores teóricos coincidieron con los calculados con la metodología de Kagami para la frecuencia fundamental de resonancia, pero no para el segundo modo, mientras que el tercero no es reportado. Por su parte, las estimaciones con el cociente espectral H/V en superficie (Nakamura, 1989) mostraron que el método tiene capacidad para predecir mejor la frecuencia en los bordes de la cuenca, ya que hacia el centro del valle muestra un error del 7% con respecto a las estimaciones teóricas. Los modos superiores no son estimados bien con este método. Para la estimación de la amplificación el método de Nakamura no llegó a resultados exitosos.

Konno (1996), identificó inconsistencias en las suposiciones de Nakamura, consideró que las microtrepidaciones consisten principalmente de ondas superficiales y que el pico fundamental de las relaciones H/V está correlacionado con el modo fundamental de las ondas Rayleigh. A iguales resultados llegaron Lachet & Bard a partir de simulaciones numéricas. Así, con base en argumentación teórica, Konno (1996) propuso dos modificaciones a la metodología propuesta por Nakamura (1989): (1) realizar un suavizado de los espectros H y V antes de calcular el cociente H/V, para lo cual propuso el uso de la ventana W_b (presentada mas abajo) y (2) no calcular la amplitud directamente del espectro obtenido de H/V, sino a partir de la fórmula $A_s = 2,5 \beta R_{MB}$, donde R_{MB} es el pico de la relación H/V suavizada con la función W_B y β es la relación entre la componente horizontal de las ondas R y las componentes horizontales de las microtrepidaciones (ondas R y L).

$$W_B(f)_c = \left[\frac{\sin(b * \log_{10}(f / f_c))}{b * \log_{10}(f / f_c)} \right]^4$$

W_b es la ventana propuesta, b es un coeficiente correspondiente con el ancho de banda, f es la frecuencia, f_c es la frecuencia central que da la simetría a la ventana en la escala logarítmica.

Este procedimiento fue aplicado en registros adquiridos en 23 sitios de Tokio, y después de representar el factor de amplificación en un mapa se comparó con el mapa de microzonificación existente, con resultados satisfactorios.

De manera similar Ohmachi y Umezono (1998) propusieron introducir en la relación espectral H/V el uso de un coeficiente que represente la proporción de ondas R presentes en las microtrepidaciones medidas.

Toshinawa *et al* (1997) encontró que los periodos predominantes de Nakamura coincidían con los de movimiento fuerte y por su parte Taber (1996) encontró que coincidían con los de movimiento débil. Ninguno encontró correspondencia entre las amplitudes. Taber (1996), Ibs-von Seht & Wohlenberg (1997) y Dravinski *et al* (1997) utilizaron los valores relativos de las amplitudes.

Sarria (1996), basado en que las microtrepidaciones corresponden a ondas de muy pequeña magnitud con bajos valores de energía, y en que los sismos de interés en la ingeniería sísmica corresponden a ondas de gran amplitud con altos valores de dicha energía, considera que (1) los periodos de vibración del método de Nakamura deben resultar inferiores, más cortos, que los que se presentan dentro del mismo depósito de suelo cuando es sacudido por un sismo intenso que introduce grandes deformaciones angulares - entre más intenso el sacudimiento más largos los periodos de vibración, es decir, más baja la frecuencia natural dominante en el depósito - y (2) que los niveles de amplificación calculados a partir del registro de microtrepidaciones deben conducir a valores mayores que aquéllos que ocurren durante un sismo intenso.

Para una microzonificación cualitativa de Basilea Fäh *et al* (1997) utilizaron el registro y estudio las microtrepidaciones entre otras variables de carácter geológico y geotécnico como tipo, consolidación y variaciones laterales del espesor de los depósitos cuaternarios, profundidad del nivel freático, y velocidad de ondas S estimadas a partir de valores de SPT. Adicionalmente realizaron

simulaciones numéricas del ruido para todos los sitios de medición de microtrepidaciones, según los modelos geológicos y geotécnicos previamente realizados, encontrando buena correlación entre los resultados de simulaciones y los de las mediciones de ruido ambiental. Concluyeron además que la amplitud de la relación espectral entre las componentes H y V, en la frecuencia fundamental, es una medida del contraste de velocidades de onda S entre los sedimentos no consolidados y la roca o basamento.

Abeki *et al* (1998), según mediciones realizadas en Los Palos (Venezuela), encontraron que los periodos predominantes están relacionados con la profundidad de la estructura sedimentaria. Ibs-Von Seht & Wohlenberg (1997) desarrollaron una metodología de análisis de los datos de microtrepidaciones para estimar el espesor de las capas sedimentarias a basamento a partir de la frecuencia estimada de análisis e interpretación de registros de microtrepidaciones. Usaron dos metodologías, el cociente espectral con una estación en sedimentos y una en roca (cociente S/R), y el cociente espectral propuesto por Nakamura (H/V). Concluyeron que el registro de microtrepidaciones en conjunto con la metodología de Nakamura se convierte en una herramienta poderosa para estimar el espesor de las capas sedimentarias basados en los siguientes resultados: (1) buena correlación entre las frecuencias calculadas por el cociente H/V para una rango amplio de profundidades entre 10 y 1000 m; (2) poca correlación de las frecuencias calculadas con el método del cociente S/R; (3) se encontró una dependencia entre las profundidades a basamento (conocidas previamente) y los picos predominantes de los cocientes espectrales. Esta dependencia está claramente controlada por la curva de la velocidad-profundidad de la onda S, observación que se relaciona con el modelo de resonancia de dos capas. En los sitios donde se conocía la profundidad a basamento, se estudió la influencia de fuentes locales de ruido, encontrando que mientras la técnica clásica (cociente S/R) es muy sensible, el cociente H/V (de Nakamura) permanece estable.

Aunque Alfaro (1997) considera que se pueden usar tanto sensores de aceleración como de velocidad para realizar las mediciones de microtrepidaciones, experimentos bajo condiciones controladas de Muccarelli (1998) mostraron grandes diferencias en los resultados obtenidos al comparar dos sensores de velocidad y uno de aceleración. Por su parte Lermo & Chávez-García (1994) consideran que el sensor de velocidad empleado debe tener una frecuencia menor que la del sitio a medir.

Diversos experimentos bajo condiciones controladas permitieron a Muccarelli (1998) llegar a las siguientes conclusiones:

- usar sensores de velocidad (con un sistema de adquisición de alta ganancia evitando interferencia por cableado externo para prevenir de ruido mecánico o electrónico) en vez de sensores de aceleración, debido a que no proporcionan suficiente resolución para obtener información de las vibraciones ambientales en las tres componentes;
- en las mediciones sugiere tener especial cuidado con las condiciones climáticas; el viento debe ser evitado con apropiadas protecciones;
- la presencia de tráfico no altera los resultados;
- se deben buscar sitios a campo abierto lo menos intervenidos posible para conseguir el mejor acoplamiento entre el sensor y el suelo (se recomienda en particular evitar hacer mediciones sobre cubiertas asfálticas);
- energías inducidas al suelo (por ejemplo con un martillo de los usados para refracción sísmica) pueden ayudar a resolver mejor el comportamiento a bajas frecuencias;
- las bases de los edificios pueden ser buenos puntos de medición por que protegen de las condiciones climáticas y están acoplados con el terreno, sin embargo debido la interacción suelo-estructura deben tomarse mediciones en los diferentes pisos para identificar las frecuencias inducidas por la vibración del edificio.

Riepl *et al* (1998) compararon 4 métodos para la estimación de respuesta de sitio en la cuenca de Volvi, en Grecia. Sus resultados muestran que las formas similares del espectro de respuesta estimado por el método longitud de coda (Phillips & Aki, 1986) y por el de Nakamura (1989), ofrecen información importante acerca de las frecuencias significativas del sitio examinado, particularmente en el rango de las bajas frecuencias. Consideran probable que la geología subsuperficial influya de igual manera las componentes vertical y horizontal del movimiento, y por lo tanto enmascare los niveles de amplificación al realizar el cociente espectral entre la componente horizontal (promediada) y la vertical.

Coutel & Mora (1998) también compararon otras técnicas de estimación de respuesta con la técnica Nakamura: (1) la relación espectral sedimento a roca usando sismos; (2) la relación espectral de ruido sedimento a roca; (3) la relación de Nakamura; (4) la relación espectral de las componentes horizontal y vertical usando sismos. Se tomó como “verdadera” la relación basamento a sedimento con datos de sismos, o SBSR. Los resultados muestran que la técnica de Nakamura, puede predecir el primer modo de resonancia con buena precisión en la mitad de la cuenca (el error varía del 100% en los bordes a 10% en la mitad de la cuenca) pero subestima el nivel de amplificación en un factor de 3. Concluyeron que la estimación del espectro de amplificación de sitio usando métodos de observación de campo no son confiables o pueden resultar incorrectos cuando una estructura de cuenca subsuperficial está presente.

Asumiendo que las microtrepidaciones están principalmente compuestas por ondas de superficie, Bard (1999) según Nakamura (2000) indica que varios investigadores están de acuerdo en dos argumentos: (1) la relación espectral H/V está relacionada básicamente con la elipticidad de las ondas R presentes en la componente vertical y (2) esta elipticidad depende de la frecuencia y muestra un pico alrededor de la frecuencia fundamental en sitios con alta impedancia entre los suelos – superficiales – y las rocas que los suprayacen.

Giraldo *et al* (1999), como parte de los estudios de microzonificación de Barcelona, encontraron que las mediciones y resultados son independientes de la hora del día en que se realicen. Destacaron la importancia de la influencia del tratamiento de los registros en los resultados obtenidos: al comparar los mismos datos por el método de Nakamura (1989) y por el de Konno y Ohmachi (1998), se encontró que entre 0 y 0,5 segundos existe correlación mientras que para periodos mayores a 1,0 no la hay.

Finalmente, se puede ver que múltiples investigadores han aplicado la metodología de Nakamura con resultados satisfactorios compartiendo la idea general que es una metodología con grandes capacidades para la estimación de periodos naturales de vibración (e.g. Field y Jacob, 1993; Ohmachi *et al*, 1994; Lermo y Chávez-García, 1994; Konno y Ohmachi, 1995; Field y Jacob, 1990; Hough *et al*, 1991; Lermo *et al*, 1992, 1994; Goula *et al*, 1997; Zaslavsky y Shapira, 1997; Triantafyllidis y Hatzidimitriou, 1997; LeBrun *et al*, 1997; Giraldo *et al*, 1999;), y otros no han tenido éxito (Pitilakis, 1997; Ingeominas, 1997; Jaramillo, 2000).

Originalmente la metodología de Nakamura introducida para la evaluación del efecto de sitio con base en registros de microtrepidaciones ha sido extendida para registros de movimiento débil (Ohmachi *et al*, 1991; Field & Jacob, 1993; Field *et al*, 1995; Theodolius *et al* 1996; Riepl *et al*, 1998) y en algunos estudios para registros de movimiento fuerte (Lermo & Chavez-García, 1994; Theodolius & Bard, 1995; Suzuki *et al*, 1995).

10.5.5 Otras aplicaciones.

En principio la relación espectral H/V propuesta por Nakamura (1989) ha sido utilizada para la determinación del periodo de vibración natural de los suelos y el factor de amplificación asociado, pero se han desarrollado otras aplicaciones, de dicha relación espectral, las cuales se listan a continuación.

1. Determinación de la profundidad a basamento (Nakamura, 2000) (Ibs-von Seht & Wohlenberg, 1996).
2. Determinación del potencial de licuación (Nakamura *et al*, 1994).
3. Verificación de comportamiento de sitio por eventos sísmicos destructivos (Toshinawa *et al*, 1997).
4. Determinación de los periodos de vibración de edificios (Muccarelli, 2000).

10.5.6 Equipos y procedimiento de medición.

La metodología de Nakamura es muy simple y fácil de realizar. Requiere de un sensor que registre las 3 componentes ortogonales del movimiento conectado con un sistema de adquisición simultáneo para 3 canales (1 para cada componente de movimiento). El sensor debe tener un periodo natural de vibración y una sensibilidad que junto con la ganancia (alta) del sistema de adquisición permitan registrar las ondas de interés, de amplitudes del orden de 10^{-6} m/s, con periodos de vibraciones entre 0.1 y 10 Hz.

Aunque se han usado tanto sensores de velocidad como de aceleración, aún no hay un consenso sobre cual sería el más adecuado. En principio uno que cumpla con los requisitos arriba expuestos sería suficiente, aunque Muccarelli (1998) adjudica el no éxito en la aplicación de la Metodología de Nakamura al uso de acelerógrafos, éstos diseñados para registro de movimiento fuerte.

En general los sensores de velocidad han sido los más usados para el estudio de las microtrepidaciones (Lermo y Chávez-García, (1994); Fah *et al* (1997); Ibs-von Seht & Wohlenberg, (1997); Kagawa *et al* (1996); Abeki *et al*, (1997); Nakamura (1998); Kanai, 1961; Abeki *et al* (1997), Stål & Westberg (1996)). También se han usado sensores de banda ancha cuando los depósitos en estudio son muy profundos (Ibs-von Seht & Wohlenberg, 1997; Abeki *et al* 1997).

Los sensores de aceleración han sido utilizados en combinación con sensores de velocidad como es el caso de Giraldo *et al* (1999). Otros han aprovechado las redes acelerográficas existentes para realizar mediciones en puntos fijos complementadas con puntos móviles (Ingeominas & Uniandes, 1997), donde los periodos calculados con relación de Nakamura, a partir de los registros de microtrepidaciones en acelerógrafos, no correlacionaron con áquellos obtenidos del análisis de los registros sísmicos de aceleración (Uniandes, 1997). Para la medición de las microtrepidaciones sólo se requiere instalar el sensor de 3 componentes en un **sitio** de interés a cualquier **hora del día** y adquirir y grabar las microtrepidaciones por un **lapso de tiempo**.

Sitio.

Las mediciones de microtrepidaciones son muy versátiles en cuanto se pueden realizar en muchos sitios de la ciudad. Los parques, los jardines, los separadores viales en pasto y las canchas de fútbol, que generalmente se encuentran distribuidos a lo largo y ancho de las ciudades, son los sitios ideales para realizar las mediciones. Algunos autores han realizado mediciones en las intersecciones de una cuadrícula de ancho variable entre 100 y 1000 m de ancho (Abeki *et al*, 1997; Toshinawa *et al*, 1997) mientras que otros han realizado las mediciones según una distribución espacial controlada por los sitios aptos para realizar las mediciones (p. ej. Stäl & Westberg, 1996).

Con respecto al ruido cultural presente en cercanías del sitio de registro, Stäl & Westberg (1996) consideran que hay 3 factores a tener en cuenta: (1) no puede existir una frecuencia predominante en los registros asociado con el ruido cultural (ejemplo una planta de energía), (2) es importante medir un espectro de frecuencias completo de tal manera que no haya ventanas en las frecuencias y (3) si hay ventanas en las frecuencias el método no puede ser aplicado. Las implicaciones de estos 3 factores enunciados se listan en la Tabla 17.

Hora del día.

Nakamura (1989) realizó mediciones continuas durante más de 30 horas ya que se propuso investigar la influencia del ruido cultural en las mediciones y encontró que las horas de la madrugada, entre la una y las cuatro, proporcionan las condiciones ideales para las mediciones. Recientemente diversos investigadores han realizado pruebas a diferentes horas del día encontrando que aunque la amplitud de las señales se incrementa en el día (un orden de magnitud con respecto mediciones nocturnas) no hay variación significativa en la forma de los espectros (Muccarelli, 1998; Giraldo *et al*, 1999). Por su parte Sommerville *et al* (1996), encontraron que la forma del espectro es la misma por debajo de 1 Hz. Algunos autores consideran inclusive que el ruido cultural puede ayudar a definir mejores el periodo fundamental de vibración del suelo, Stäl & Westberg, 1996 indican que mediciones en cercanías de una vía con tráfico constante se traducirían en mejores resultados, y Muccarelli (1998) encontró que energizando el suelo con un martillo de refracción sísmica, se puede modelar mejor los periodos.

Lapso de tiempo.

Con respecto al tiempo de registro de las señales aún no hay un consenso; algunos autores han registrado las microtrepidaciones durante 10 minutos cada hora entre la una y las cuatro de la mañana (Fäh *et al*, 1997); otros utilizaron registros de cinco minutos de duración para mediciones cada hora durante 24 horas y tres registros de 40 segundos para mediciones esporádicas (Toshinawa *et al*, 1994); mientras que otros consideran que se deben grabar cinco registros de un minuto (Muccarelli, 1998). Por su parte Ibs-von Seht & Wohlenberg (1997) utilizaron las secciones mas “silenciosas” de los registros de 10 minutos, obteniendo señales, para el análisis, con longitud variable entre 1 y 10 minutos.

Tabla 17. Criterios para selección de sitio de registro de microtrepidaciones según Stal & Westberg (1996)

1.	La superficie debe estar libre de asfalto o concreto. El instrumento debe estar en contacto con el terreno y debe ser colocado por debajo de la capa vegetal.
2.	No se deben realizar mediciones en cercanías de maquinaria que generen ondas en las bajas frecuencias.
3.	Evitar realizar mediciones cerca de edificios altos, los vientos fuertes podrían hacer vibrar el edificio e inducir vibraciones en las bajas frecuencias en la cimentación del edificio. Estas vibraciones pueden afectar las mediciones.
4.	Si las mediciones se hacen cerca de vías, estas deben ser planas. Bombas de agua pueden crear ondas transitorias que se pueden mezclar en los registros de las microtrepidaciones.
5.	El tráfico en las vías debe ser lo mas continuo posible. De tal manera que los registros no tendrán señales transitorias. En la ciudad hay muchas fuentes de vibración, las mediciones cerca de vías son las mejores ya que el tráfico es una fuente de ruido mas poderosa.
6.	Cuando se mide en cercanías de vías transitadas, es mejor medir en un sitio cercano a una intersección, tal que las ondas provengan de diferentes direcciones.
7.	Se deben hacer mediciones lejos de tuberías y bombas de agua, las cuales pueden afectar las mediciones. Para evitar estas fuentes, sería bueno contar con mapas de infraestructura.

10.5.7 Procesamiento y análisis de las señales.

El procesamiento básico de las señales corresponde al tratamiento que en general se aplica a señales, convertidas de analógicas a digitales - discretizadas - según periodos de tiempo, las cuales serán analizadas en el dominio de las frecuencias. La técnica más común de análisis espectral usada para el estudio de las microtrepidaciones es la transformada rápida de Fourier, conocida por sus siglas en inglés FFT²¹. Algunos autores han usado también la función de la densidad espectral. El hecho de usar la FFT implica que se deben realizar unos procesamientos previos a las señales para poder aplicarla apropiadamente. A

²¹ *Fast Fourier Transform*

continuación los procesamientos generales que se realizan a las señales.

Corrección de la línea de base.

La amplitud de la señal que se toma en campo generalmente viene desplazada en una cantidad determinada debido a varios factores como alteraciones en el equipo, inestabilidad de la señal misma, etc.

La corrección por línea de base consiste en determinar la cantidad que se debe correr cada ordenada para poder encontrar la línea real de cero. Para tales fines se debe calcular un polinomio que mejor se ajuste a los datos originales por el método de los mínimos cuadrados, este polinomio conforma una línea recta, de tal manera que los coeficientes del polinomio luego son restados de la señal original para obtener una función centrada en el origen (Math Works, 1996)

Filtros.

Se usan para filtrar frecuencias que no son del interés en relación con los modos de vibración dinámica de los suelos. Hay de tres tipos de filtros básicos: pasabajas, pasaltas y pasabanda. Mientras que el primero detiene todas las señales por encima del valor del filtro pasabajas, el segundo, detiene todas las señales por debajo del valor del filtro pasaltas. El filtro pasabanda detiene las frecuencias que están por fuera de un rango dado (MathWorks, 1996).

- En microtrepidaciones estos filtros se han aplicado cuando se han escogido frecuencias de adquisición mucho mayores que la frecuencia de interés. El filtro de pasabanda es uno de los mas aplicados (p. ej. Muccarelli, 1998; Giraldo et al, 1999).

Efecto *aliasing*: Teorema de muestreo y Frecuencia de Nyquist.

Este es un efecto asociado en general, al análisis espectral. En primer lugar el sistema de adquisición debe evitar el efecto *aliasing*, problema potencial en señales discretizadas. El teorema de muestreo dice que el muestreo con un

periodo T tiene sentido solamente si la señal a ser discretizada no tiene energía importante en frecuencias, $F \geq 1/(2T)$. Esto significa que el rango de frecuencias útil es 0 a $F/2$ Hz, donde $F/2$ es conocida como la Frecuencia de Nyquist. (e.g. Martinelli, 1992). Se dice entonces, que el efecto de *aliasing* ocurre si la diferencia de las frecuencias cae dentro del rango de interés ($f < F/2$), lo que significa que cuando se realiza el análisis espectral, las frecuencias de interés - parte real -, se mezclan con las no interés - parte imaginaria -. (e. g. Stäl & Westberg, 1996). Para evitar esto el sistema de adquisición de las microtrepidaciones - y en general de señales - debe tener un filtro “antialias”. Generalmente estos filtros vienen incorporados en el sistema de adquisición.

Efecto *leaking* o truncado.

Este es otro efecto asociado con el uso de la FFT. La transformada de Fourier supone que la señal analizada se repite de manera infinita en el tiempo, lo que implica que la señal incluirá siempre periodos completos. Ese no es el caso de las señales con duración finita, como las de las microtrepidaciones, de tal manera que cuando algún periodo queda truncado la suposición de FFT no es válida y esto afecta los resultados. Este problema se soluciona al usar una ventana, que minimiza las amplitudes al inicio y al final de la señal. Algunas de las ventanas más conocidas son: rectangular, Hamming, Hanning, Kaiser-Bessel, *Truncated gaussian* y *Flat top* (p. ej. Randall & Tech, 1987).

- La ventana de Hanning ha sido la mas usada en los análisis de microtrepidaciones (p. ej. Giraldo *et al*, 1999; Stäl & Westberg, 1996). Muccarelli (1998) usó la función coseno de 5%.

Los coeficientes de una ventana de Hanning están definidos por la siguiente expresión:

$$w(k) = 0,5(1 - \cos(2\pi * \frac{k}{n+1})), \quad k = 1, K, n \quad (\text{Mathworks, 1996})$$

Suavizado del espectro.

El suavizado de señales permite obtener curvas más limpias, libres de frecuencias superpuestas a las frecuencias dominantes.

- Entre los más usados en microtrepidaciones se encuentran el triángulo de Pascal (Stäl & Westberg), la campana de Gauss (Giraldo *et al*, 199), la ventana de Parzen de 0,5 Hz (Toshinawa *et al*, 1994) y la ventana de tiempo del 10% del coseno escalonada (Riepl *et al* 1998).

Safak (1991) demostró la importancia del tratamiento de las señales anotando que los diversos procesamientos pueden influir en los resultados; a pesar que trabajó con registros de sismos fuertes, esta anotación debe ser tenida en cuenta en el tratamiento de las señales de microtrepidaciones.

10.6 DISCUSIÓN Y SÍNTESIS

Discusión.

Las múltiples experiencias realizadas alrededor del mundo – algunas documentadas en el § 10.5.4 – que han usado las microtrepidaciones como fuente de ondas sísmicas en conjunto con la metodología de Nakamura (1989), y que han resultado o no exitosas, no son comparables completamente por las siguientes razones:

- han sido realizadas bajo diversas condiciones ambientales (aún no hay un estándar sobre requisitos de los sitios de medición);
- diferentes equipos de medición han sido empleados para el registros de las señales;
- han sido aplicados diferentes métodos de procesamiento (selección de filtros, ventanas, y rutinas de análisis espectral).

Sobre la primera, Stäl & Westberg (1996) y Muccarelli (1998) han indicado que existen una serie de factores a tener en cuenta durante el registro de las

microtrepidaciones, entre ellas (1) la de realizar mediciones durante condiciones climáticas de calma, sin lluvia y sin vientos (el viento no se encuentra acoplado con los depósitos de suelo, de tal manera que puede afectar los mediciones de dos formas: generar movimientos adicionales en el suelo e inducir vibraciones directamente en el sensor); (b) proteger el sensor con un balde o caja metálica durante las mediciones (esto minimiza por un lado el efecto del viento en el caso de que se presente y evita cualquier interferencia de cableado (mecánica o eléctrica); (c) realizarlas sobre terreno abierto lo menos intervenido posible y alejado de estructuras (hidráulicas o edificios).

Sobre la segunda – equipos - se puede decir que aunque Muccarelli (1998) con base en experimentos con dos sensores de velocidad y uno de aceleración descarta el uso de sensores de aceleración, y en su lugar sugiere el uso de sensores de velocidad (encontró que la mayoría de los resultados no exitosos usando Nakamura radicó en el uso de los primeros), Alfaro (1997) considera que las mediciones se pueden realizar indistintamente con sensores de velocidad o de aceleración siempre y cuando los niveles de ruido ambiental tengan una amplitud mayor que el nivel de resolución del equipo, como es el caso de las grandes ciudades, condición soportada por Lermo & Chávez-García (1994). La calidad y resolución de las señales de microtrepidaciones está controlada por los siguientes factores: periodo natural de vibración y sensibilidad del sensor, ganancia y resolución del sistema de adquisición. En principio un sensor y un sistema de adquisición que permitan registrar microtrepidaciones del suelo con frecuencias entre 0,05 y 10 Hz y con amplitudes del orden del 10^{-6} m/s sería suficiente.

Sobre la tercera Giraldo *et al* (1999), Safak (1991), Camacho (2000) destacan la importancia del tratamiento, procesamiento y análisis de los registros y su influencia en los resultados. Por ejemplo (Ibs-von Seht & Wohlenberg, 1997) realizaron deconvolución de las señales, adquiridas con sensores de velocidad con periodos diferentes (0,5 y 1 Hz) para normalizarlas en 0,5 Hz. Por su parte

Stäl & Westberg (1996), que utilizaron señales adquiridas con un sensor de velocidad de 1 Hz, en vez de aprovechar las vibraciones detectadas por el sensor por debajo de 1 Hz, aplicaron un filtro pasaltas de 1 Hz, argumentado que la respuesta del sensor no es plana por debajo de 1 Hz y, por lo tanto no es útil.

Aunque aún no hay un consenso sobre los soportes teóricos que controlan y describen la relación espectral H/V, muchos estudios experimentales **muestran que la relación espectral de Nakamura permite diferenciar entre tipos de suelos con características estratigráficas, velocidad de onda S y profundidad a basamento similares**. Esa es la gran fortaleza de la herramienta que junto con los bajos costos (sólo requiere un sensor de tres componentes); la simpleza y facilidad de las mediciones (se pueden realizar a cualquier hora del día y no requieren mas de 10 minutos de registros) y, la resolución espacial que permite alcanzar (se puede alcanzar mayor detalle que con redes acelerográficas de movimiento fuerte), la han convertido en una técnica muy atractiva que se ha difundido rápidamente alrededor del mundo. Las ventajas del método han permitido a diversos investigadores y planificadores urbanos la elaboración de mapas preliminares de zonificación sísmica (o mapas cualitativos), y de zonificación de suelos. Incluso ha servido para modificar planos geotécnicos de ciudades como Lieja, Bélgica (Euroseismod, 1998).

Síntesis.

En relación con los parámetros que proporciona la relación espectral H/V, el consenso mínimo entre las diversas experiencias exitosas (ya sea numérica o experimentalmente) muestra los siguientes **alcances, limitaciones y, rango de validez:**

1. Específicamente sirve para determinar los periodos fundamentales de vibración de los suelos.
2. No sirve para identificar otros periodos de vibración (de segundo, tercero o cuarto orden).

3. Funciona muy bien en suelos cuya columna estratigráfica puede estudiarse por el modelo de una sola capa.
4. Modelos de mas de una capa, o estructuras geológicas subsuperficiales, afectan los periodos estimados con Nakamura, de tal manera que no se puede predecir el periodo principal de vibración.
5. No se conoce muy bien, a que corresponde la amplificación del cociente espectral de Nakamura; Nakamura (1989) indica que la amplitud máxima de dicho cociente corresponde al factor de amplificación de los suelos, pero múltiples resultados exitosos en la estimación del periodo predominante (comparado con los obtenidos a partir de registro de movimiento fuerte) han fallado en la estimación del factor de amplificación.
6. Los resultados de las mediciones son independientes de la hora del día y no afectan los periodos de vibración estimados.

Con respecto a la explicación de la Técnica de Nakamura, existen dos tendencias en la actualidad, la primera argumenta que la relación está controlada por las ondas SH, mientras que la segunda muestra que está controlada por la onda R. Pero ambas tendencias han demostrado que los periodos calculados del pico de la relación H/V coinciden con los periodos calculados a partir de las ondas S presentes en los registros de movimiento fuerte.

Por otro lado, la falta de robustez de la Metodología de Nakamura para evaluar el factor de amplificación espectral, podría estar relacionado con que capta indistintamente energías generadas sobre el suelo y energías que inciden desde la base. El factor de amplificación depende del cociente de la impedancia (suelo-roca).