

Evaluación empírica del periodo fundamental de depósitos de suelos

Gaspar Besio(1); Ramón Verdugo (2)

(1) *Ingeniero Civil, M.Sc.* CMGI Ltda.

(2) *Ingeniero Civil, Ph.D.* CMGI Ltda.

gbesio@cmgi.cl rverdugo@cmgi.cl Virginia Opazo 48, Santiago

Resumen

Utilizando los registros sísmicos del terremoto de Tohoku disponibles de la red de acelerómetros japonesa KiK-net, tanto de superficie como en profundidad, se evaluó la función de transferencia de cada sitio con información geotécnica, obteniéndose en particular el periodo fundamental de cada sitio. Por otra parte, se evaluó la razón espectral H/V de la coda de los registros sísmicos, obteniéndose con esta técnica el periodo preponderante de cada sitio. Los resultados obtenidos indican que es posible distinguir dos tipos de respuesta. Por un lado, se identificaron los sitios tipo A, donde las funciones de transferencia claramente muestran un periodo fundamental de amplificación, el cual resultó similar al estimado a partir de las razones espectrales H/V. Por otro lado, se identificó un segundo grupo, los sitios tipo B, donde las funciones de transferencia no muestran un único periodo de amplificación, existiendo más bien un rango de periodos donde se amplifica la respuesta del sitio. Se verificó empíricamente que los sitios tipo A presentan una significativa mayor amplificación que los sitios tipo B.

Palabras-Clave: Efecto Sitio, Razón Espectral, Amplificación Sísmica, Funciones de Transferencia

Abstract

Using the seismic records from the Tohoku earthquake provided by the KIK-net seismograph network, the transfer functions at each site was estimated, determining the fundamental period at each location. Additionally, the spectral ratios H/V were calculated using the last portion of each seismic record, obtaining the predominant period at each site. Two different site types were identified, the first one, denominated sites type A, correspond to the sites where the transfer functions clearly show one period in which most of the amplification occurs. On the other hand, sites type B correspond to the sites where the transfer functions show a band of periods that can be amplified. It was empirically verified that sites type A develops significantly greater amplification factors than sites type B.

Keywords: Site effects, Spectral Ratio, Seismic Amplification, Transfer Functions

1 Introducción

La evidencia empírica dejada por los grandes terremotos ocurridos en el mundo muestra claramente que la intensidad de los movimientos desarrollados en la superficie del suelo está fuertemente controlada por el tipo de suelo y el espesor de los sedimentos. Un caso notable de amplificación es el observado durante el terremoto de México en 1985, de magnitud 8.1, donde el movimiento fue amplificado por un factor de 20, o incluso más, en los sitios constituidos por depósitos de suelo profundos de materiales finos blandos [1]. Por otro lado, afloramientos de roca y depósitos de suelo rígidos constituidos por materiales granulares densos, han mostrado una reducción significativa de la perturbación sísmica, que puede inferirse directamente del limitado o nulo daño observado en las estructuras emplazadas en dichos terrenos [2], [3] y [4]. En consecuencia, las condiciones locales del suelo tienen que ser consideradas con el propósito de evaluar adecuadamente la demanda sísmica que induce cada sitio.

El diseño sísmico de estructuras es usualmente realizado a través del análisis espectral modal, donde la demanda sísmica se caracteriza por un espectro de diseño, el cual se considera dependiente de las condiciones del terreno. La mayoría de los códigos de diseño sísmico disponibles en todo el mundo toman en cuenta las condiciones locales del sitio con el fin de definir diferentes formas espectrales, lo que representa en definitiva un criterio de resistencia sísmico.

En el presente artículo se utilizan registros sísmicos obtenidos en Japón, tanto en superficie como en profundidad, de manera que la función de transferencia de cada sitio es evaluada empíricamente, obteniéndose en particular el periodo fundamental de cada sitio. Por otra parte, se evalúa la razón espectral H/V de la coda del registro sísmico, cuando el terreno se espera tienda a vibrar libremente, obteniéndose con esta técnica el periodo preponderante de cada sitio. Ambos valores son comparados y se propone una explicación para cuando estos periodos resultan similares y para cuando no.

2 Base de Datos de Registros Sísmicos

Para el desarrollo del presente estudio se utilizó como base los datos de la red de acelerómetros japonesa KiK-net, perteneciente al National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience [5]. Esta red contiene aproximadamente 700 sondajes distribuidos en Japón, según se puede apreciar en la Fig. 1. En cada uno de estos sondajes se encuentran instalados dos acelerómetros de alta sensibilidad (Hi-net), dispuestos uno en superficie y otro en profundidad. Adicionalmente, la gran mayoría de estos sitios cuenta con mediciones de velocidad de ondas de corte en profundidad, Vs. Esta información se considera relevante para interpretar las diferencias entre los registros de aceleraciones obtenidos en la superficie y profundidad de cada sitio. Mediante esta red de acelerógrafos se obtuvo registros de aceleraciones en 525 sitios durante el terremoto de Tohoku, ocurrido el 11 de Marzo de 2011. Este terremoto tuvo una Magnitud de Momento, M_w , de 9.0 y correspondió a un terremoto interplaca (subductivo), de características similares a los terremotos de alta intensidad que ocurren en Chile. Por esta razón, junto con la gran cantidad de registros disponibles, fue escogido para el presente estudio.

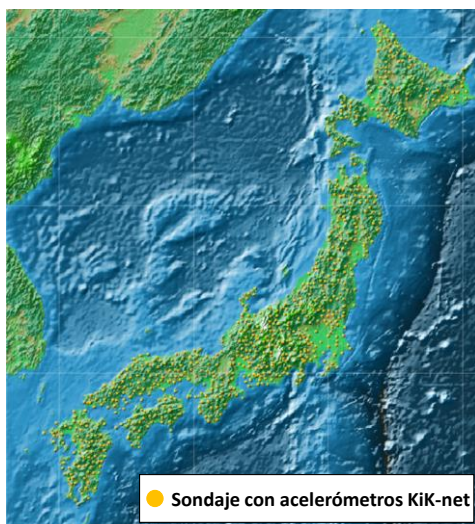


Fig. 1. Estaciones sísmicas con sondajes, red KiK-net (Fuente NIED)

Se realizó inicialmente un filtrado de la base de datos mencionada, descartándose aquellos registros con las siguientes dos características: a) Sitios donde el basamento rocoso se ubicara a menos de 30 m de la superficie (se consideró roca a aquellos estratos con velocidad de ondas de corte, V_s , mayor a 800 m/s) y b) registros con aceleración máxima en superficie, PGA, menor a 0.1 g. Este descarte redujo el total de sitios a analizar de 525 a 44.

3 Procesamiento de los Registros Sísmicos

Los registros del terremoto de Tohoku considerados en el presente estudio fueron procesados mediante el software Matlab, con el cual, se realizó a cada registro una corrección por línea base, reduciendo a nulo el desplazamiento al final del registro. Una vez realizado esto se aplicó un filtro tipo Butterworth, de manera de filtrar frecuencias fuera del rango 0.1 – 25 Hz.

Por otra parte, se evaluó la razón espectral H/V, correspondiente a la división de los espectros de Fourier horizontal y vertical en superficie. Este análisis fue calculado en una ventana de tiempo establecida al final de cada registro de superficie, la cual se extendió desde el 90 al 100% de la Intensidad de Arias del registro.

Para la selección de estas ventanas fue necesario aplicar un “ventaneo”, proceso que corresponde a multiplicar los registros de la ventana por una función sinusoidal, de manera que los valores iniciales y finales de la ventana sean nulos. Este procedimiento se realiza con el fin de evitar la aparición de frecuencias altas que puedan distorsionar los resultados [6]. Adicionalmente, dado que la razón espectral se calcula dividiendo dos espectros de Fourier, es posible que ocurran errores numéricos en los casos en que el denominador sea cercano o igual a cero. Para evitar esto, al denominador se le adicionó una constante, la cual se calculó como el máximo valor del espectro de Fourier vertical dividido por 50. De esta manera, se evitaron errores numéricos, y al mismo tiempo, no se distorsionaron de manera importante los resultados, ya que la constante adicionada en el denominador es despreciable comparada con los valores del registro.

4 Función de Transferencia Empírica y Perfil de Vs del Sitio

En cada sitio donde se encuentran disponibles los registros en superficie y en profundidad, de las tres componentes de aceleraciones, se evaluó la función de transferencia del sitio, a través de calcular el cociente de los espectros de Fourier (por ejemplo: espectro Fourier componente N-S de registro superficie / espectro Fourier componente N-S de registro en profundidad).

Los resultados obtenidos fueron separados en dos grandes grupos. Por un lado, se identificaron los sitios tipo A, donde las funciones de transferencia claramente muestran una amplificación, con la existencia de un periodo fundamental del sitio, el cual se repite en ambas componentes horizontales (N-S y E-W). Por otro lado, se identificó un segundo grupo, los sitios tipo B, donde las funciones de transferencia no muestran un único periodo de amplificación, existiendo más bien un rango de periodos donde se amplifica la respuesta del sitio. La cantidad de sitios clasificados como tipo A es de 17, mientras que los 27 terrenos restantes pertenecen a la categoría de sitios tipo B. En la Fig. 2 se presentan a modo de ejemplo las funciones de transferencia obtenidas en un sitio del tipo A y otro sitio de tipo B. Para cada sitio también se incluyen para cada componente los espectros de respuesta elástico de pseudo-aceleración para un 5% de amortiguamiento respecto del crítico.

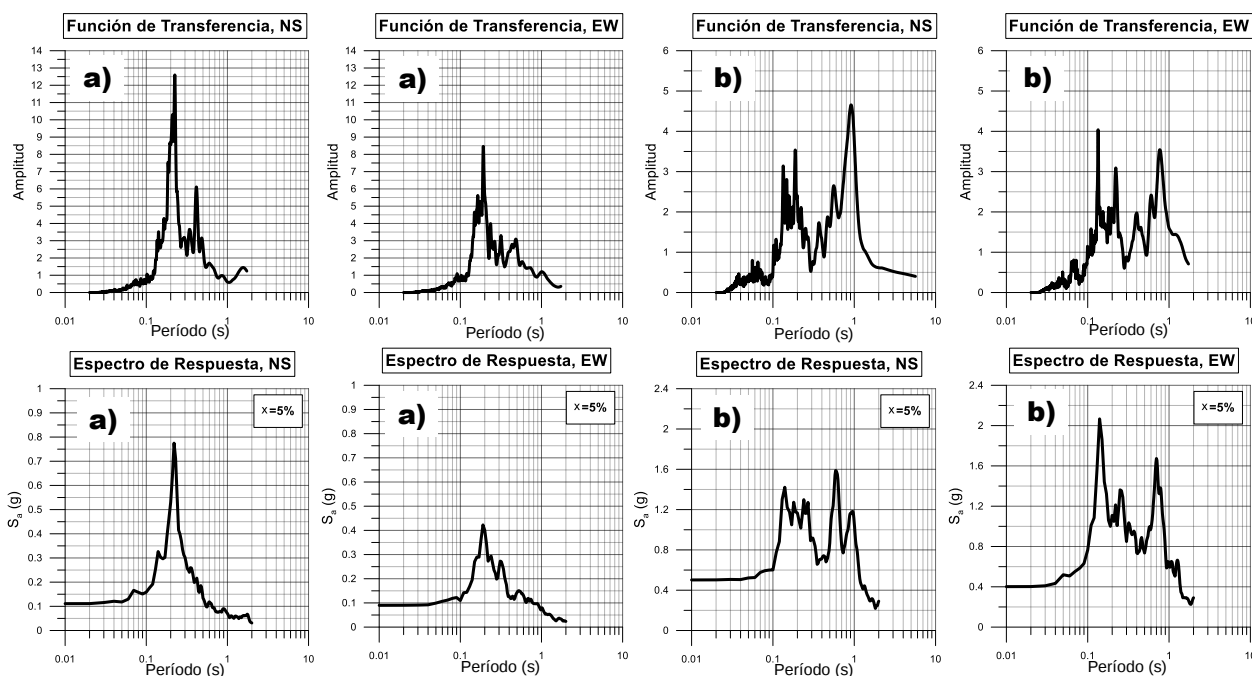


Fig. 2.- Función de transferencia y espectro de respuesta
a) Sitio tipo A (estación AKTH14). b) Sitio tipo B (estación FKSH11)

En el sitio tipo A se observa que la función de transferencia indica un periodo fundamental del sitio de 0.2 s. Este valor también corresponde al periodo donde los espectros de respuesta presentan la mayor amplificación.

Por otra parte, las funciones de transferencia del sitio tipo B no evidencian un claro periodo fundamental del sitio. En la dirección N-S, el periodo fundamental podría ser cercano a 1 s, mientras que en la dirección E-W podría ser cercano a 0.15 s. No obstante, las funciones de transferencia de

ambas direcciones presentan varios máximos relativos, que sugieren más bien un rango de periodos donde existe amplificación. Esto es ratificado por los espectros de respuesta en ambas direcciones, los cuales presentan un rango de periodos donde se amplifica la respuesta.

En la Fig. 3 se presenta la ubicación de los sitios que se han identificado como tipo A y tipo B. Se observa que la distribución de estos sitios no sigue un patrón y por tanto el tipo de sitio (A o B) no se correlaciona con la ubicación espacial de éstos.

En la Fig. 4 se presentan los perfiles de velocidad de onda de corte en profundidad, reportados para los sitios tipo A y tipo B, cuyas funciones de transferencia y espectros de respuesta se presentaron en la Fig. 2. La observación de estos perfiles sugiere que el sitio con respuesta sísmica tipo A presentaría un perfil de velocidad de ondas de corte que aumenta con la profundidad, en cambio el sitio con respuesta sísmica tipo B presentaría un perfil de velocidad de onda de corte con una inversión de velocidades, evidenciando la presencia de un estrato de suelo de mayor rigidez, bajo el cual se desarrollan estratos de menor rigidez.

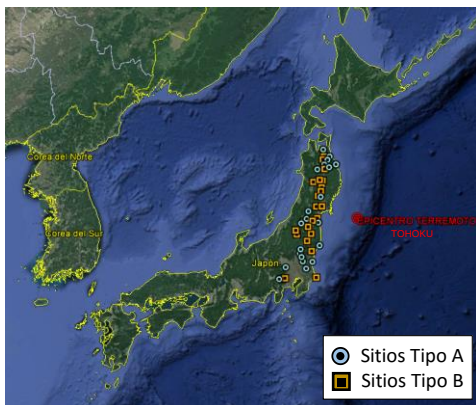


Fig. 3.- Distribución espacial de sitios tipo A y tipo B

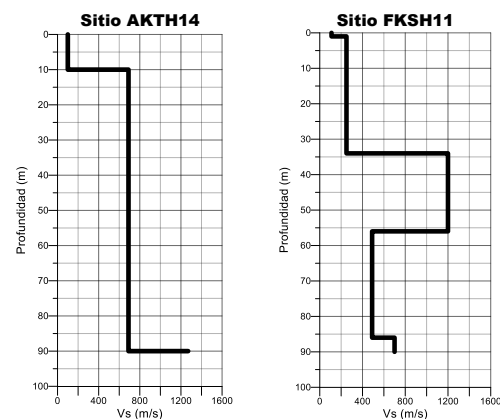


Fig. 4.- Perfil de velocidad de ondas de corte. Sitio tipo A (AKTH14) y tipo B (FKSH11)

Esta característica del perfil de velocidades de ondas de corte podría en una primera aproximación explicar la diferencia que se observa en la respuesta sísmica de cada sitio. En el caso de un perfil de suelos regular con incrementos graduales de velocidad de ondas de corte, es posible estimar que la función de transferencia resultante estaría asociada a una respuesta sísmica con un periodo fundamental de vibración bien definido. En cambio, cuando el perfil del terreno es tal que presenta suelos de variadas rigideces, con estratos de menor rigidez bajo estratos de mayor rigidez, la respuesta sísmica en superficie resulta más compleja y varios modos de vibración cercanos entre si y de similar nivel de amplificación serían posibles.

De acuerdo a los resultados de los análisis realizados, en las Figs. 5 y 6 se presentan las funciones de transferencia de los sitios que pueden ser clasificados como tipo A y tipo B, respectivamente. En estas figuras se incluye tanto la función de transferencia en la dirección Norte-Sur como Este-Oeste para cada sitio.

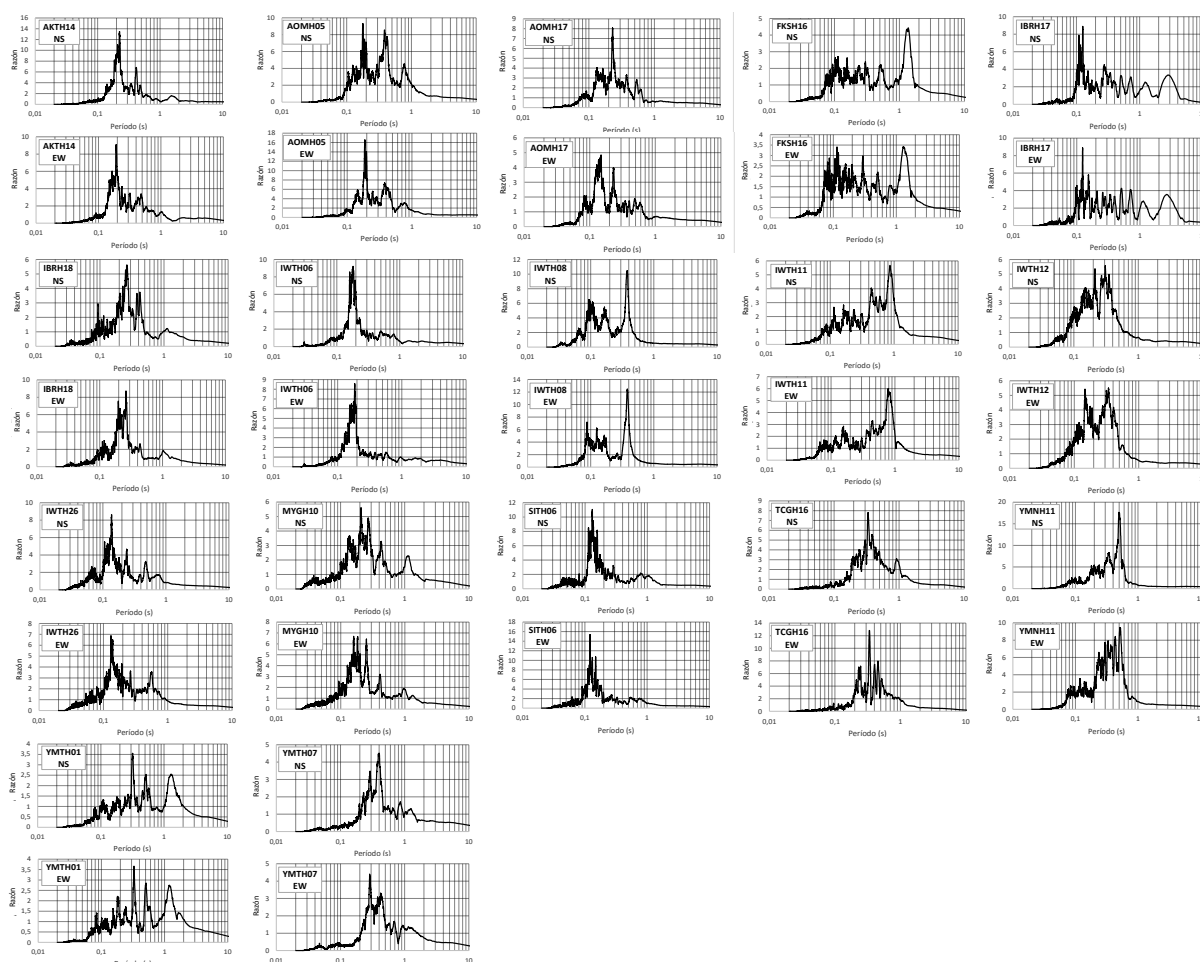


Fig. 5.- Funciones de transferencia, sitios tipo A

Se observa que mientras para los sitios tipo A existe un período en donde la amplificación predomina para ambas direcciones, los sitios tipo B, en general, presentan más de dos periodos donde la respuesta se amplifica, siendo posible definir un ancho de banda donde se desarrollaría la máxima amplificación. Este ancho de banda, que se presenta con barras rojas en la Fig. 6, es variable, llegando a involucrar en algunos casos un amplio rango de periodos, por ejemplo de 0.07 a 1.5 s (MYGH05).

Adicionalmente, para cada tipo de sitio, las amplitudes máximas obtenidas de las funciones de transferencia empíricas se grafican como histogramas en la Fig. 7.

Se observa que, en general, la amplificación máxima de los sitios A son significativamente mayores a la de los sitios tipo B, ya que por ejemplo, el 20% de las amplificaciones máximas en los sitios tipo A es mayor o igual a 12, mientras que el mismo porcentaje en los sitios tipo B es mayor o igual a 6. Desde un punto de vista práctico, resulta importante destacar que en aquellos sitios donde existe un periodo fundamental definido, la amplificación para dicho periodo es alta y por tanto debe ser considerada en el diseño sísmico. Por otra parte, cuando existe una amplia banda de periodos que amplifican, dicha amplificación es menor, pero afecta a una mayor cantidad de estructuras asociadas a la banda de periodos.

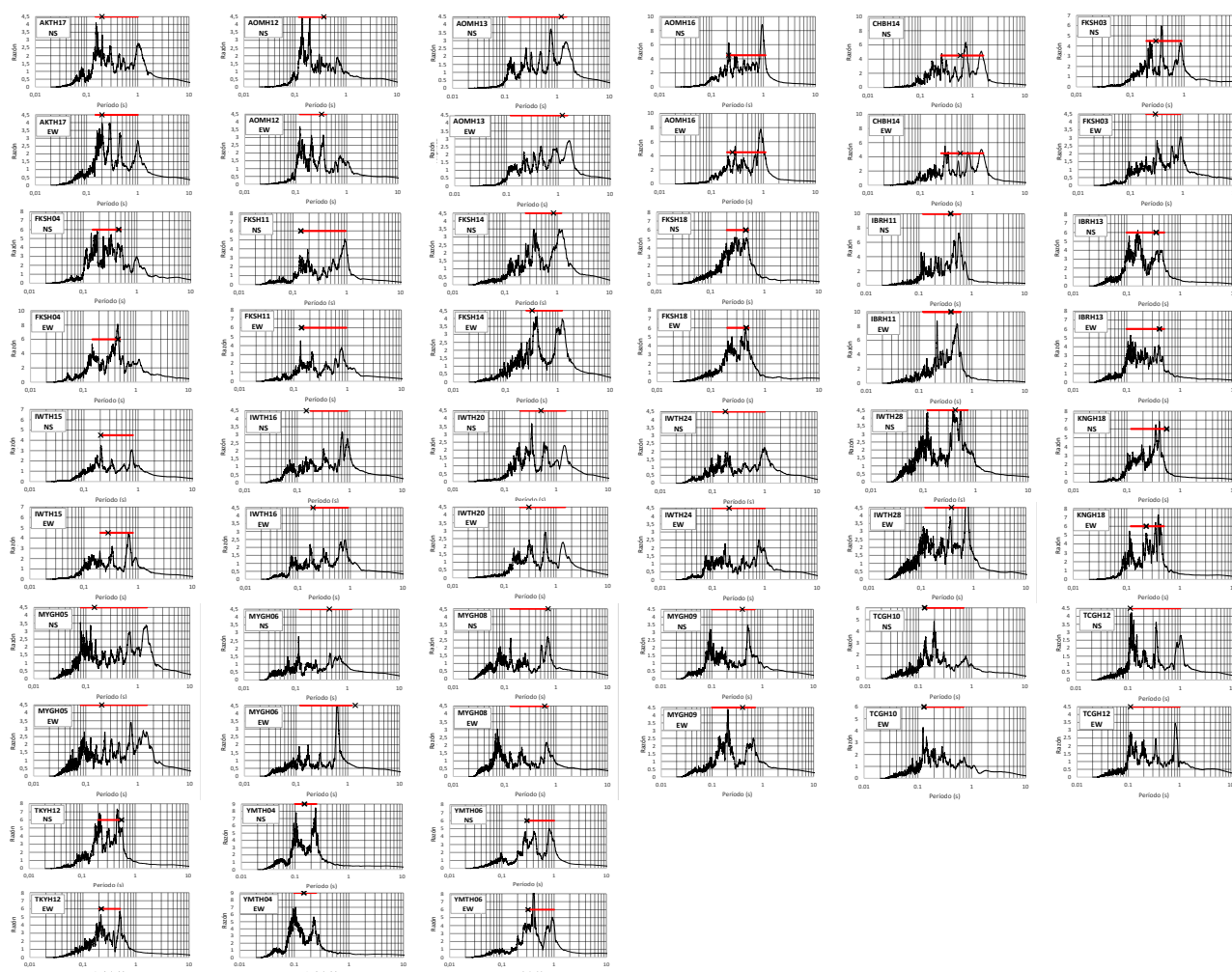


Fig. 6.- Funciones de transferencia, sitios tipo B

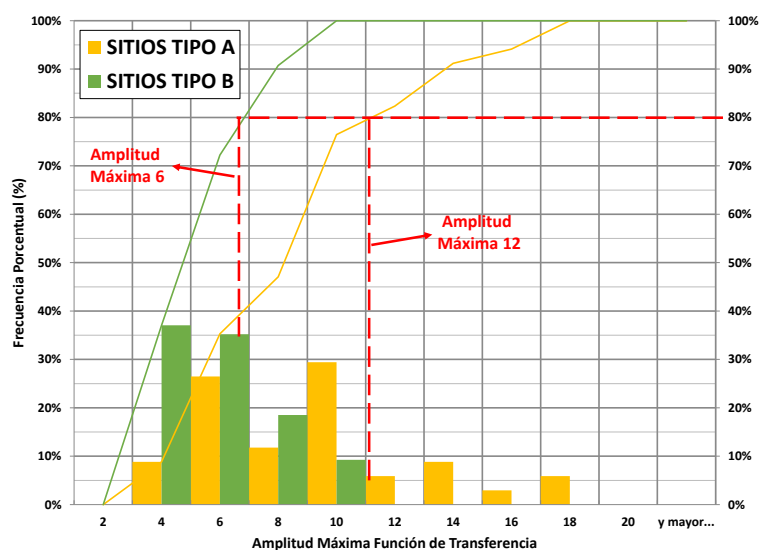


Fig. 7.- Histogramas sitios tipo A y tipo B

5 Razón espectral H/V

Teniendo presente que en la práctica lo usual es no disponer de mediciones en superficie y profundidad para evaluar la función de transferencia de un sitio, el método de Nakamura [7], o razón espectral H/V de vibraciones ambientales, resulta atractivo tanto por su rapidez como bajo costo. En los sitios anteriormente analizados no se dispone de información sobre evaluación de la razón espectral H/V, por lo que se optó por utilizar los registros del terremoto de Tohoku. Para esto se aisló de cada registro de aceleración de superficie, una ventana de tiempo que comprende desde el 90 al 100% de la Intensidad de Arias de cada registro. Esta ventana se puede considerar como la coda de cada registro y donde principalmente el terreno tiende a vibrar libremente.

A modo de ejemplo, en la Fig. 8 se presentan las razones espectrales H/V obtenidas para los sitios tipo A (estación AKTH14) y sitio tipo B (estación FKSH11). Resulta importante notar que en el sitio tipo A existe una importante similitud entre la razón espectral H/V y la función de transferencia presentada en la Fig. 2. En relación al periodo predominante, ambos resultados coinciden con un valor $T = 0.2$ s. En el caso del sitio tipo B, la razón espectral H/V reproduce el ancho de banda presentado por la función de transferencia de la Fig. 2, resultando difícil establecer un periodo predominante.

En este contexto, se considera que el método de las razones espectrales puede ser un buen indicador sobre que periodos pueden ser amplificados en cada sitio, ya que este método permite replicar razonablemente la forma de las funciones de transferencia. En consecuencia, el espectro de razones espectrales permite estimar el tipo de sitio.

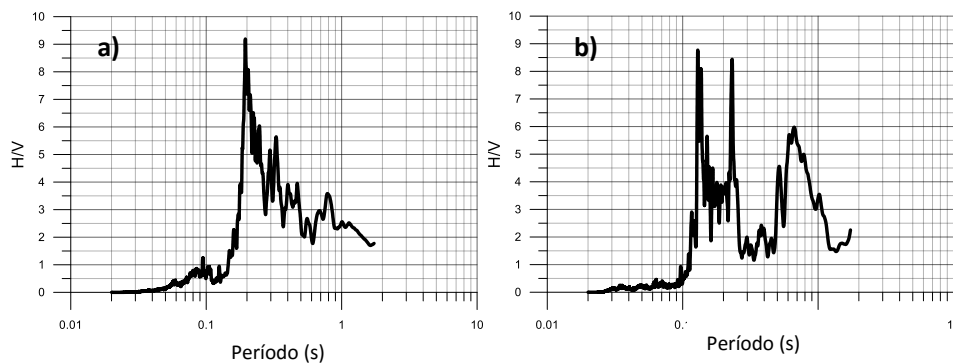


Fig. 8.- Razón espectral H/V obtenido en a) Sitio tipo A (AKTH14) b) Sitio tipo B (FKSH11)

Para los sitios tipo A, en la Fig. 9 se presenta el periodo fundamental obtenido directamente desde las funciones de transferencia empíricas y el periodo predominante proporcionado por las gráficas de la razón espectral H/V. Se observa que ambos periodos son prácticamente coincidentes, con lo cual para sitios tipo A es posible concluir que mediciones de la razón espectral H/V proporcionan una excelente estimación del periodo fundamental de un sitio.

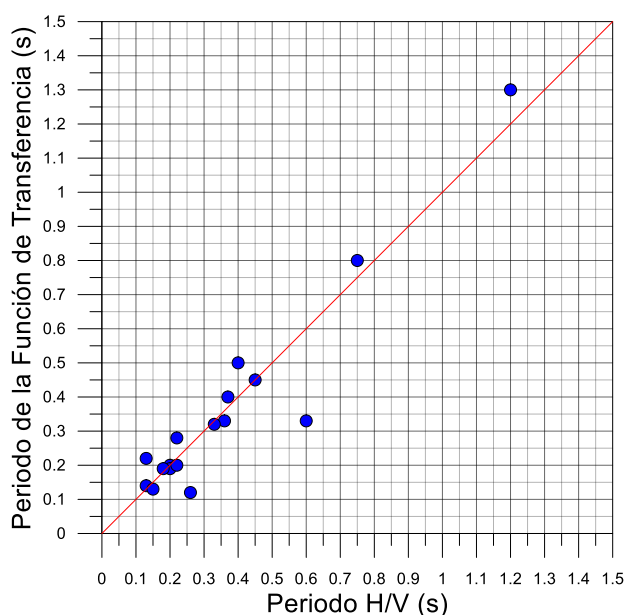


Fig. 9.- Períodos predominantes mediante funciones de transferencia y razones espectrales, sitios tipo A

6 Conclusiones

En el presente estudio se evaluó la capacidad del método de razones espectrales para estimar el periodo predominante de un sitio. Para esto, se utilizaron los registros sísmicos asociados al terremoto de Tohoku, los cuales pertenecen a la red de acelerómetros japonesa KiK-net [5]. Con la base de datos de 44 sitios, fue posible calcular las funciones de transferencia asociadas a este evento, junto con las razones espectrales utilizando la coda de dichos registros. Además, se cuenta con el perfil de velocidades de ondas de corte en profundidad para cada sitio analizado, lo cual permitió interpretar los resultados obtenidos a partir de las características geotécnicas del terreno.

Se identificaron dos tipos de sitios, que se denominaron A y B. Los sitios tipo A corresponden a los sitios donde un solo período particular es amplificado tanto en la dirección Norte-Sur como en la dirección Este-Oeste; mientras que los sitios tipo B están asociados a terrenos donde más de un período es amplificado, pudiéndose definir una banda de períodos en la cual se produce la amplificación.

De acuerdo a los perfiles de velocidades de ondas de corte en profundidad, los sitios tipo A en general corresponderían a sitios donde las rigideces de los estratos aumenta en profundidad, y además las respectivas impedancias no son significativas. Por otro lado, en los sitios tipo B se detectaron en mayor medida inversiones de velocidades y altas impedancias. Se considera que estas singularidades en los sitios podrían estar asociadas a una similar amplificación de varios períodos. Sin embargo, más investigación sobre esto es necesaria.

Para los sitios tipo A existe una excelente correlación entre el período evaluado por el método de razones espectrales y el determinado mediante la función de transferencia. Adicionalmente, los sitios tipo A presentan mayor amplificación que los sitios tipo B.

Mediante el método de razones espectrales fue posible replicar la forma de las funciones de transferencia tanto para los sitios tipo A como para los sitios tipo B.

7 Referencias

- [1] Celebi, M., J. Princ, C. Dietel M. Onate and G. Chavez. *The culprit in Mexico City amplification of motions*. Earthquake Spectra Vol. 3, pp. 315-328; 1987.
- [2] Borchardt, R. *Effect of local geology on ground motion near San Francisco Bay*. Bulletin of Seismological Society of America. Vol. 60, No.1, pp. 29-61; 1970.
- [3] Seed, H.B., Romo M., Sun J., Jaime A. and Lysmer J. *The Mexico earthquake of September 19, 1985 – relationships between soil conditions and earthquake ground motions*. Earthquake Spectra. Vol. 4, No. 4, pp. 687-729; 1988.
- [4] Watanabe T. and Karzulovic J. *The seismic ground motions of May, 1960 in Chile*. Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Vol. 17; 1960.
- [5] National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED). Strong motion accelerograms database, <http://www.kyoshin.bosai.go.jp>
- [6] Santamarina, J.C., Fratta, D. . *Introduction to Discrete Signals and Inverse Problems in Civil Engineering*, ASCE Press, Reston, VA; 1998.
- [7] Nakamura, Y. *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*. Quarterly Reports of the Railway Technical Research Institute, Vol. 30, pp. 25-33; February 1989.