



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

CORRELACIÓN DE RAZONES ESPECTRALES H/V DE REGISTROS SISMOLÓGICOS Y CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE SUELOS DE SANTIAGO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL CON MENCIÓN EN
ESTRUCTURAS, CONSTRUCCIÓN Y GEOTECNIA

FRANCISCA LORETO LEZANA GONZÁLEZ

PROFESOR GUÍA:

SERGIO RUÍZ TAPIA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

CÉSAR PASTÉN PUCHI

FELIPE LEYTON FLORES

SANTIAGO DE CHILE

2014

RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL
TITULO DE: Ingeniero Civil con mención en
Estructuras, Construcción y Geotecnia.
POR: Francisca Loreto Lezana González.
FECHA: 29/10/2014
PROFESOR GUÍA: Sergio Ruiz.

CORRELACIÓN DE RAZONES ESPECTRALES H/V DE REGISTROS SISMOLÓGICOS Y CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE SUELOS DE SANTIAGO

La caracterización geotécnica de la cuenca de Santiago es de gran importancia para determinar se respuesta dinámica. La infraestructura urbana de Santiago ha mostrado diferentes niveles de daños tras los terremotos de Valparaíso 1985 (Mw 7.8) y del Maule 2010 (Mw 8.8), los cuales se han correlacionado con la geológica superficial y razones espectrales (H/V) de estudios previos.

En la presente memoria se trabajó con registros sismológicos de tiempo continuo, de 25 sismógrafos banda ancha ubicados sobre diferentes tipos de suelos de la cuenca de Santiago para obtener razones espectrales (H/V). Los resultados obtenidos permiten agrupar las razones H/V en 4 grupos según la forma de las curvas: planas, con peak somero, con peak marcado y con peak muy marcado. Al correlacionar estos tipos de curva con los depósitos geotécnicos se pudo concluir que los registros obtenidos sobre roca y grava tienden a mostrar razones espectrales planas, mientras que otros tipos de suelo muestran razones con uno o más peak de distinta amplitud. Se estudió la variación de las razones de 5 estaciones durante 24 horas y de 29 días, obteniéndose que el periodo predominante asociado a los peak de las curvas se mantiene constante, con lo que se concluyó que la técnica de razones espectrales H/V es un método estable para estimar el periodo fundamental del suelo. Como recomendación práctica, dadas las diferencias en los valores H/V alcanzados durante el análisis diario, se sugiere utilizar un registro temporal de al menos media hora dentro del rango de las 1am hasta las 4am, periodo donde se observa mayor estabilidad en las señales. En otro horario se recomienda usar mayor tiempo de registro.

Contenido

1.	Introducción.....	1
2.	Base de Datos	4
2.1.	Introducción.....	4
2.2.	Instrumentos Utilizados	6
2.3.	Instalación de Estaciones	8
2.4.	Recopilación de los Registros.....	9
2.5.	Registros del Arreglo	9
2.6.	Comentarios y Conclusiones	11
3.	Características de La Cuenca de Santiago.....	12
3.1.	Introducción.....	12
3.2.	Depósitos y suelos de la cuenca de Santiago.....	15
3.3.	Velocidad de Propagación de la Onda de Corte de los depósitos y suelos de la cuenca de Santiago	17
3.4.	Comentarios y Conclusiones	18
4.	Razón espectral superficial entre las componentes horizontal y vertical (H/V) usando el software Geopsy®.....	19
4.1.	Introducción.....	19
4.2.	Razón espectral entre las componentes horizontal y vertical (H/V) usando el Software Geopsy®.....	21
4.3.	Comentarios y Conclusiones	23

5. Estimación de Periodos Fundamentales del Suelo en los Sitios donde hay Estaciones de Intervención	24
5.1. Introducción	24
5.2. Razones Espectrales para los Sitios donde hay Estaciones Sismológicas	25
5.2.1. Clasificación de los H/V	25
5.2.2. Periodos Fundamentales.....	30
5.3. Comentarios y Conclusiones	33
6. Comparación de los Periodos Fundamentales con las Características Geotécnicas con campañas anteriores.....	35
6.1. Introducción	35
6.2. Comparación con las razones espectrales obtenidas por Pasten (2007)	35
6.3. Comparación de los Periodos Fundamentales con las Características Geotécnicas de la Cuenca/mapa Leyton et al, (2011).....	37
6.4. Comentarios y Conclusiones	39
7. Variaciones Temporales de H/V	40
7.1. Introducción	40
7.2. Variación Diaria de H/V	41
7.3. Variación Mensual de H/V	48
7.4. Comentarios y Conclusiones	53
8. Recomendación de uso de H/V	55
8.1. Introducción	55
8.2. H/V Para Distintos Tiempos de Registro.....	56

8.3. Comentarios y Conclusiones	58
9. Comentarios y Conclusiones Finales.....	59
10. Bibliografía.....	61
Anexo A: Días Registrados por el Arreglo de Estaciones Sismológicas	65
Anexo D: Variación Diaria de la DG31 entre las 8 pm del 8 de Enero y las 8 pm del 9 de Enero del 2014	75

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Ubicación de las Estaciones Utilizadas del Arreglo Denso.....	5
Tabla 3.1 Velocidades Mínimas de Onda de Corte	17
Tabla 4.1 Criterios de selección de ventanas ingresados a Geopsy.....	22
Tabla 5.1 Periodos Naturales H/V con Peak Somero.....	31
Tabla 5.2 Periodos Naturales H/V con Peak Marcado	31
Tabla 5.3 Periodos Naturales con Peak Muy Marcado	31
Tabla 5.4 Profundidad del Basamento y Velocidades de Onda de Corte para las Estaciones	32
Tabla 6.1 Distancia entre Registros	37

Índice de Figuras

Figura 2.1 Estaciones Utilizadas del Arreglo Denso de Estaciones Sismológicas.....	6
Figura 2.2 Digitalizador Quanterra 330 y Sismómetro Trillium Compacto 120s a	7
Figura 2.3 Instalación de la Estación DG03 - Padre Hurtado.	8
Figura 2.4 Registros del día 8 de Enero del 2014 de la Estación DG06 - Penalolen	10
Figura 2.5 Registros del día 8 de Enero del 2014 de la Estación DG06 - Penalolen Filtrado y Corregido.....	10
Figura 3.1 Isopacas de la profundidad del basamento rocoso según Araneda et al, (2000). s.	13
Figura 3.2 Unidades de la Cuenca de Santiago según Leyton et al, (2011).	14
Figura 4.1 Efectos Mecánicos de las Ondas Sísmicas.....	19
Figura 4.2 Ventanas seleccionadas para el registro desde las 7 horas hasta las 8hrs en horario universal del día 9 de Enero de la estación DG21 – Quilicura.....	22
Figura 4.3 Razón espectral resultante de la señal mostrada en la Figura 4.2	23
Figura 5.1 Razones Espectrales Planas.....	26
Figura 5.2 Razones Espectrales Planas.....	27
Figura 5.3 Razones Espectrales con Peak Somero.....	28
Figura 5.4 Razones Espectrales con Peak Marcado..	29
Figura 5.5 Razones Espectrales con Peak Muy Marcado.....	30
Figura 6.1 Comparación de Razones Espectrales.....	36
Figura 6.2 Mapa de Leyton et al, (2011) con los tipos de H/V obtenidos.....	38
Figura 7.1 Variación Diaria DG06 - Penalolen (Plana).....	43

Figura 7.2 Variación Diaria DG24 - El Bosque (Plana).....	44
Figura 7.3 Variación Diaria DG31 - Santiago Centro (Peak Somero).....	45
Figura 7.4 Variación Diaria DG30 - Maipu (Peak Mercado).....	46
Figura 7.5 Variación Diaria DG21 - Quilicura (Peak Muy Marcado).....	47
Figura 7.6 Variación Enero 2014 DG06 - Penalolen (Plana).....	50
Figura 7.7 Variación Enero 2014 DG24 - El Bosque (Plana).....	50
Figura 7.8 Variación Enero 2014 DG31 - Santiago Centro (Peak Somero).....	51
Figura 7.9 Variación Enero 2014 DG30 - Maipu (Peak Mercado).....	51
Figura 7.10 Variación Enero 2014 DG21 - Quilicura (Peak Muy Marcado).....	52
Figura 7.11 Variación Octubre 2013 DG21 - Quilicura (Peak Muy Marcado).....	52
Figura 8.1 Razones Espectrales con distintos tiempo de registros para un HV Plano	56
Figura 8.2 Razones Espectrales con distintos tiempo de registros para un HV con Peak Somero	57
Figura 8.3 Razones Espectrales con distintos tiempo de registros para un HV con Peak Mercado	57
Figura 8.4 Razones Espectrales con distintos tiempo de registros para un HV con Peak Muy Marcado	58

1. Introducción

Estudios sobre los daños estructurales durante terremotos, desprenden diferencias en los movimientos sísmicos entre distintos tipos de suelos. Se observan diferencias entre las intensidades de daño de sitios con similares distancias epicentrales, pero distintos tipos de suelo. (Duke, 1958; Kawase y Aki, 1989; Astroza et al, 1989; Molina, 2010 entre muchos otros).

Los efectos de sitio o condiciones locales son modificaciones en amplitud, duración y contenido de frecuencia que experimentan las ondas sísmicas cuando llegan a la superficie (Kramer, 1986). Se puede establecer una relación entre dicho efecto, la rigidez y la profundidad del depósito de suelos donde se propaga la onda. De esta manera, dos parámetros que pueden cuantificar el efecto de sitio, son la amplificación con respecto a una estación de referencia en roca y el periodo natural de vibración del suelo.

Los japoneses en los años 30 a partir de los trabajos de Sezawa (1930, 1935) comenzaron a identificar el problema del efecto de sitio. Posteriormente surgieron otros importantes trabajos como los de Kanai y Yoshizawa (1956) y Kanai (1957). Estos investigadores obtuvieron expresiones algebraicas en el dominio de las frecuencias para el movimiento de la superficie en relación a una onda incidente, asumiendo ondas de corte sísmicas planas estacionarias propagadas verticalmente. Su trabajo consideró un modelo de dos capas horizontales de velocidad constante; también se incluyó el comportamiento visco-elástico para estimar los períodos de vibración del suelo dados por:

$$T_n = \frac{4H}{V_s(2n - 1)} \quad (1.1.)$$

Donde n es el número de modo, H es la profundidad del suelo y V_s es la velocidad de onda de corte del suelo.

El terremoto de 1985 en la Ciudad de México Mw 8.1, representa un caso ideal donde se cumplen los supuestos más comunes de la teoría de amplificación de los suelos (Ruiz y Saragoni, 2009), es decir, un fuerte contraste entre la impedancia del suelo, el comportamiento del suelo casi lineal y las ondas de corte incidentes verticales debido a la condición de ser un terremoto de subducción con epicentro lejano en el Pacífico (distancias epicentrales de más de 400 km), es así

como para este terremoto, se supone que la mayoría de las teorías aceptadas de amplificación están verificadas parcialmente (Kawase y Aki, 1989; Gómez y Saragoni, 1995; Gómez, 2002). Estas teorías sólo pueden reproducir el período de respuesta natural del suelo, pero fallan al estimar las relaciones de la gran amplificación del suelo y grandes duraciones observadas. Bard y Tucker (1985) y Geli et al., (1988) también han señalado que las amplificaciones observadas en el campo son sistemáticamente mayores que los valores predichos usando modelos teóricos.

Santiago se ubica en una zona con actividad sísmica permanente producto de la subducción entre la placa de Nazca bajo la Sudamérica por lo que determinar el comportamiento sísmico de la cuenca de Santiago es relevante por su alta densidad de población y concentración de infraestructura con un gran sector industrial. La respuesta dinámica de la cuenca ha sido estudiada por diferentes autores quienes proponen que su comportamiento depende de las características de cada sitio, como las propiedades geotécnicas de los depósitos de suelos y la profundidad del basamento rocoso (Pasten 2007; Bonnefoy-Claudet et al., 2009). Por otra parte, durante los terremotos de Valparaíso en 1985 (Mw 7.8) y del Maule de 2010 (Mw 8.8) se observaron distintos niveles de daños en el gran Santiago (Astroza et al., 1989; Molina 2010; Leyton et al., 2011), existiendo comunas con intensidades sísmicas mayores que otras, para similares distancias epicentrales (Molina 2010). Esta evidencia empírica indica que el efecto de sitio podría tener una relación directa con el movimiento y duración que se percibe en superficie dado un evento sísmico (Boore, 2004).

Durante esta memoria se trabajará con registros sismológicos de tiempo continuo, provenientes de 25 sismógrafos que componen un denso arreglo temporal de estaciones sismológicas en los diferentes tipos de suelo a lo largo de toda la cuenca de Santiago. De esta forma es posible estimar las diferencias en el comportamiento dinámico de los distintos tipos de suelo.

La técnica utilizada para analizar los registros será la razón espectral entre las componentes horizontal y vertical (H/V) o Técnica de Nakamura, (Nakamura, 1989). Este método generalmente utiliza registros de 20 a 30 minutos para obtener la razón espectral H/V (Bord et al., 1985) asociando la frecuencia del máximo valor de la razón espectral (peak) con la frecuencia predominante del suelo en dicho sitio (Bonnefoy-Claudet et al., 1993; Lachet et al., 1996). Además, se puede utilizar la forma de la razón espectral para estimar el contraste de

impedancia entre los sedimentos y la roca basal (Woolery et al., 2002; Ruiz y Saragoni, 2009), sin embargo se ha observado que la razón espectral pierde esta facultad en sitios con bajo contraste de impedancia entre el suelo y la roca basal (Bonney-Claudet et al., 2009).

De esta forma, se establecerán los parámetros dinámicos de los sitios donde se ubican las estaciones, como lo es el periodo natural de vibración y al forma de la razón espectral. Estos resultados se correlacionarán con la información geológica superficial de los diferentes tipos depósitos de la cuenca (Leyton et al, 2011), la velocidad de onda de corte y las distintas profundidades del basamento (Araneda, 2000), para así determinar las diferencias imperantes entre los parámetros dinámicos para los distintos suelos de Santiago.

También se busca comparar las mediciones obtenidas en este trabajo con campañas anteriores descritas por Pasten (2007) en donde también se realizaron numerosas razones espectrales a lo largo de toda la cuenca. La idea es utilizar los H/V realizados en lugares muy cercanos a las estaciones de intervención para comparar estos resultados.

Por último se dan recomendaciones de las ventanas temporales de registro de ruido para realizar la razón espectral. Para ello se realizarán análisis que buscan visualizar cómo cambian los H/V a lo largo del tiempo, para verificar así que tan estable resulta este método a lo largo de los distintos meses registrados, buscando diferencias entre los resultados a partir de registros de mañana o de noche, de semana o de fin de semana, etc. Identificando cual resulta ser el tiempo idóneo para realizar la razón espectral.

2. Base de Datos

2.1. Introducción

En este estudio se considera el uso de registros de ruido superficiales, que corresponden a mediciones de velocidad en tiempo continuo en todas las dimensiones del espacio, las dos componentes horizontales Norte-Sur (N-S) y Este-Oeste (E-O) y la componente vertical (Z).

El arreglo de estaciones sismológicas comprende más de 30 puntos distribuidos en toda la cuenca. De ellas sólo se pudo trabajar con 26 sincronizadas que entregan datos correctos.

La red comenzó a instalarse desde el 7 de Junio del 2013, llegando al 70% de los puntos en Enero del 2014, y la tercera semana de Marzo alrededor de 12 estaciones fueron levantadas y llevadas al norte de Chile para formar una red de medición para el terremoto de Iquique del 2014 (Mw 8.1), por lo que a hasta el 26 de Marzo se tienen alrededor de 270 días registrados.

Como lo muestra la Figura 2.1 en la vista aérea de Santiago las estaciones abarcan toda el área en estudio. Los sismógrafos están ubicados sobre distintos suelos en la cuenca desde grava bien graduada (Grava de Santiago) en los sectores Este–Centro hasta suelos finos (pumicítas) en el extremo Oeste de la cuenca como se podrá observar en el Capítulo 3. Además en la Tabla 2.1 se presentan las coordenadas geográficas de las estaciones, el sector o comuna de referencia el día de inicio de las mediciones y el día termino. La distancia promedio entre estaciones aledañas es de 12 Km abarcando 47 Km de ancho y 45 Km de alto, barriendo una superficie de 2000 Km² aproximadamente.

En este capítulo se dan a conocer los instrumentos e instalación de las estaciones, así como la recopilación de datos y forma de los registros que serán analizados.

Tabla 2.1 Ubicación de las Estaciones Utilizadas del Arreglo Denso

Estación	Latitud	Longitud	Sector / Comuna	Inicio	Fin
DG01	33°27.448'S	70°39.682'O	Santiago	11-07-2013	06-09-2014
DG03	33°35'2.118"S	70°49'39.690"O	Padre Hurtado	07-08-2014	02-04-2014
DG05	33°26'27.27"S	70°38'37.03"W	Cerro Santa Lucia	20-07-2013	06-09-2013
DG06	33°28'43.49"S	70°31'37.56"O	Peñalolén	21-07-2013	06-09-2013
DG11	33°32'2.782"S	70°35'3.895"O	La Florida	24-07-2013	06-09-2013
DG12	33°26'56.046"S	70°41'54.576"O	Estación Central	27-09-2013	23-03-2014
DG13	33°23'36.534"S	70°34'1.590"O	Vitacura	26-09-2013	27-11-2014
DG15	33°27'3.906"S	70°45'46.014"O	Pudahuel	01-10-2013	24-03-2014
DG16	33°28'10.860"S	70°34'56.850"O	Nuñoa	04-10-2013	29-01-2014
DG18	33°38'56.916"S	70°49'58.290"O	Maipo	05-10-2013	18-01-2014
DG19	33°33'36.954"S	70°38'37.488"O	La Pintana	25-10-2013	02-04-2014
DG20	33°37'56.784"S	70°40'24.828"O	San Bernardo	04-10-2013	02-04-2014
DG21	33°22'2.520"S	70°42'42.882"O	Quilicura	06-10-2013	24-02-2014
DG23	33°47'46.932"S	70°43'39.774"O	Paine	03-10-2014	02-02-2014
DG24	33°33'30.282"S	70°40'32.124"O	El Bosque	04-10-2014	08-02-2014
DG25	33°20'52.020"S	70°40'48.936"O	Huechuraba	28-10-2013	20-03-2014
DG26	33°25'19.542"S	70°32'45.696"O	Las Condes	03-10-2013	29-03-2014
DG27	33°24'37.002"S	70°42'42.594"O	Quinta Normal	25-10-2013	06-03-2014
DG29	33°35'28.854"S	70°34'20.730"O	Puente Alto	25-10-2014	02-04-2014
DG30	33°29'40.236"S	70°45'32.106"O	Maipú	25-10-2014	03-04-2014
DG31	33°27'42.618"S	70°39'6.876"O	Santiago	24-10-2014	03-04-2014
DG32	33°15'22.314"S	70°37'59.490"O	Colina/Chicureo	31-10-2013	29-03-2014
DG33	33°35'48.684"S	70°47'5.934"O	Maipo	14-12-2013	24-03-2014
DG34	33°36'2.592"S	70°29'44.694"O	Pirque	04-01-2014	24-03-2014
DG35	33°27'54.618"S	70°31'6.798"O	Peñalolén	27-10-2013	02-04-2014

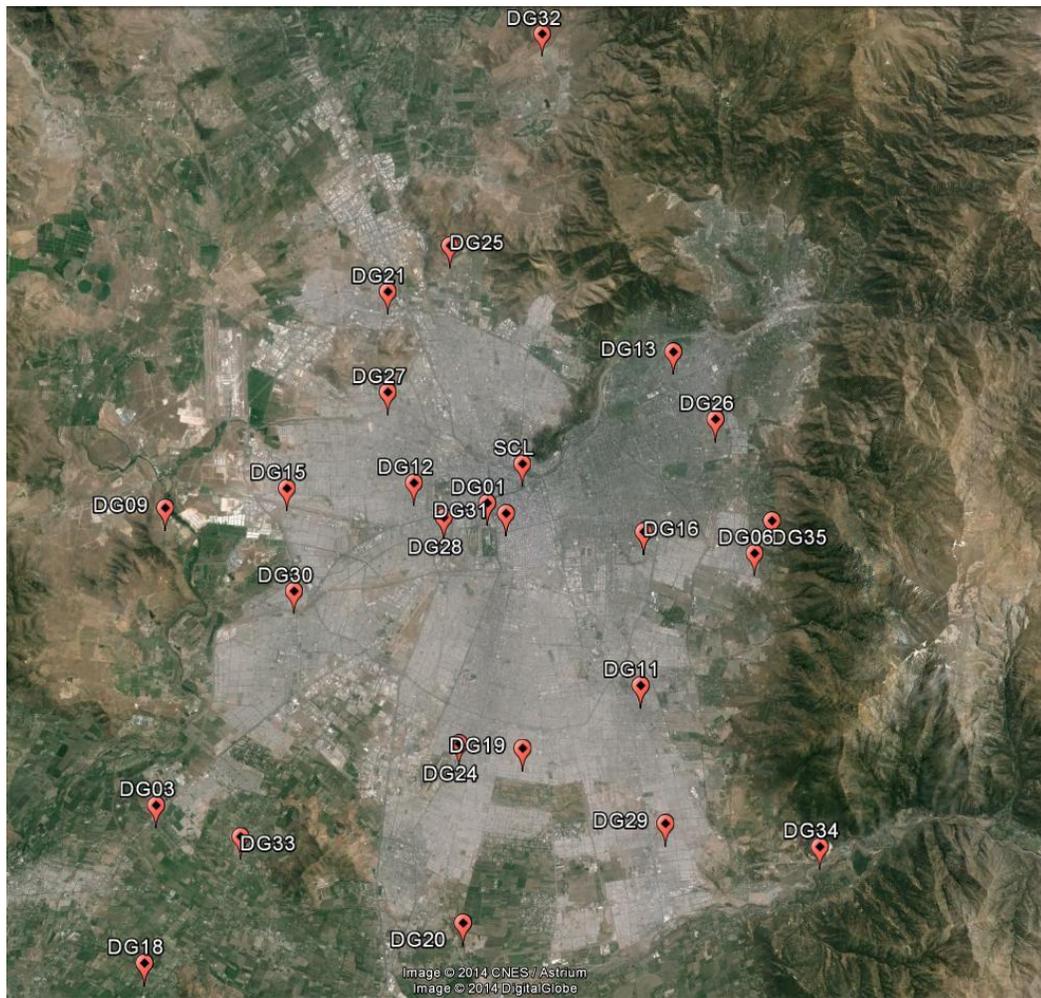


Figura 2.1 Estaciones Utilizadas del Arreglo Denso de Estaciones Sismológicas en la vista aérea del Gran Santiago

2.2. Instrumentos Utilizados

Existen diferentes tipos de estaciones sísmicas: sismómetros de periodo corto, sismómetros de banda ancha, acelógrafos, etc. En esta memoria se trabajó con sismómetros de banda ancha, los cuales presentan una respuesta instrumental lineal para el rango de frecuencias que interesa estudiar en esta memoria.

Cada estación utilizada en esta memoria está compuesta por 4 equipos: un digitalizador, una unidad registradora de datos, sensores y una antena GPS.

Cada sismómetro de cada estación cuenta con un digitalizador Quanterra Q330 (Figura 2.2). Este tiene 3 ó 6 canales de alta resolución y es de baja potencia. El Q330 puede escribir datos en cuatro sistemas receptores diferentes al mismo tiempo. En los controles de sensores, se tiene una función automática de recentrado de masas y las funciones de calibración.



Figura 2.2 Digitalizador Quanterra 330 a la izquierda y Sismómetro Trillium Compacto 120s a la derecha

Los sismómetros son Trillium Compacto 120s (Figura 2.2), que corresponden a un sismómetro de banda ancha con un geófono resistente. Este instrumento incorpora un diseño de un sensor de retroalimentación de fuerza triaxial simétrica con una respuesta plana a la velocidad de 120 segundos.

Cada sismógrafo tiene una frecuencia de muestreo de 100 [muestras/s] registrando en tiempo continuo, desde su instalación, la velocidad del sitio en las 2 componentes horizontales Norte-Sur (N-S) y Este-Oeste (E-O) y la vertical (Z). El registro se entrega en cuentas y la constante para obtener m/s tiene un valor de 5.017×10^8 [cuentas/m/s].

2.3. Instalación de Estaciones

Al momento de elegir el lugar donde se situarán las estaciones se debe buscar que ésta permanezca lo más alejada de cualquier perturbación, debido a la gran sensibilidad de los instrumentos. Además es importante contar con algún suministro de energía permanente ya que se necesita que los instrumentos midan en tiempo continuo.

La Figura 2.3 se muestra el sitio de la estación DG03 – Padre Hurtado en donde se puede ver la forma de posicionar los sensores in situ, además de la caja con las herramientas necesarias para obtener las señales.

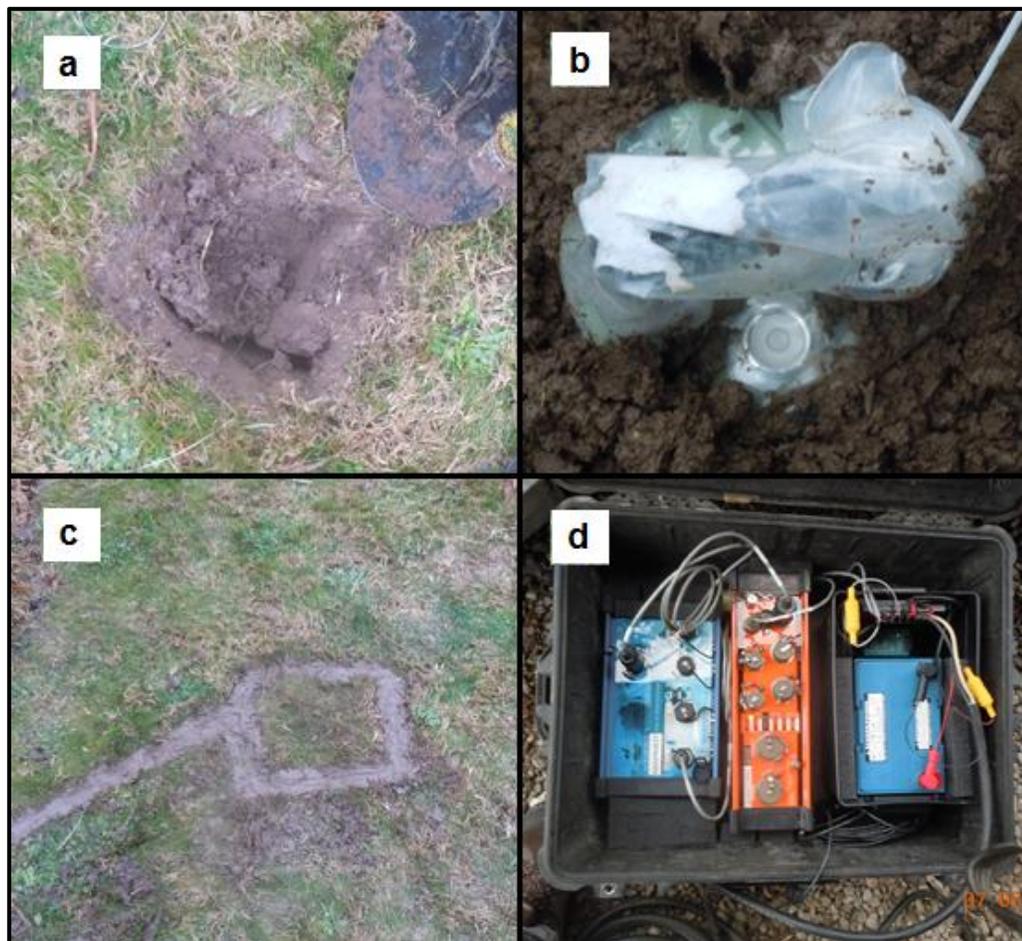


Figura 2.3 Instalación de la Estación DG03-Padre Hurtado en (a) una excavación superficial tipo para dejar los sensores en una ubicación permanente, en (b) se presenta los sensores en la excavación y en (c) se observa la excavación completamente cubierta. Por ultimo en la (d), se puede ver la caja con el digitalizador y demás instrumentos que transforman las vibraciones del suelo en los registros.

2.4. Recopilación de los Registros

Existen dos formas de obtener los datos de las estaciones: éstas son copiando los datos del digitalizador o recibirlos mediante señal on line, estas señales son ingresadas al Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile de donde se copian los registros para ser usados en esta memoria.

La base de datos se conformó con una carpeta para cada estación, dentro de ella se tiene una carpeta para cada año de medición y al interior de ella una carpeta para cada día juliano que contiene los archivos en formato Antilope. Una vez obtenidos los datos se deben transformar de formato Antilope a formato SAC. Se eligió este formato por ser un tipo legible por Geopsy programa con el cual se analizaran las señales.

En el anexo A se muestra el registro de los días que poseen información de los sismogramas.

2.5. Registros del Arreglo

Luego de tener los registros en formato SAC, se procede a filtrar la señal entre 0.1 y 20 [Hz], para evitar la influencia de periodos largos. Además las señales son corregidas por tendencia y promedio.

En las Figura 2.4 y Figura 2.5 se tiene un ejemplo de registro correspondiente a las 24 hrs ente las 8 pm del día 8 de Enero y las 8 pm del día 9 de Enero del 2014 de la estación DG06 - Penalolen, en donde se muestran tratadas las 3 componentes, Vertical (Z), Este-Oeste (E-O) y Norte-Sur (N-S) sin filtrar ni removida la tendencia y filtrado y con la tendencia removida respectivamente.

Dependiendo del análisis que se quiera realizar, el registro se puede cortar para la ventana temporal necesaria, ya que trabajar con el día completo requiere de muchos recursos computacionales debido a que presenta alrededor de 8.6 millones de datos por componente.

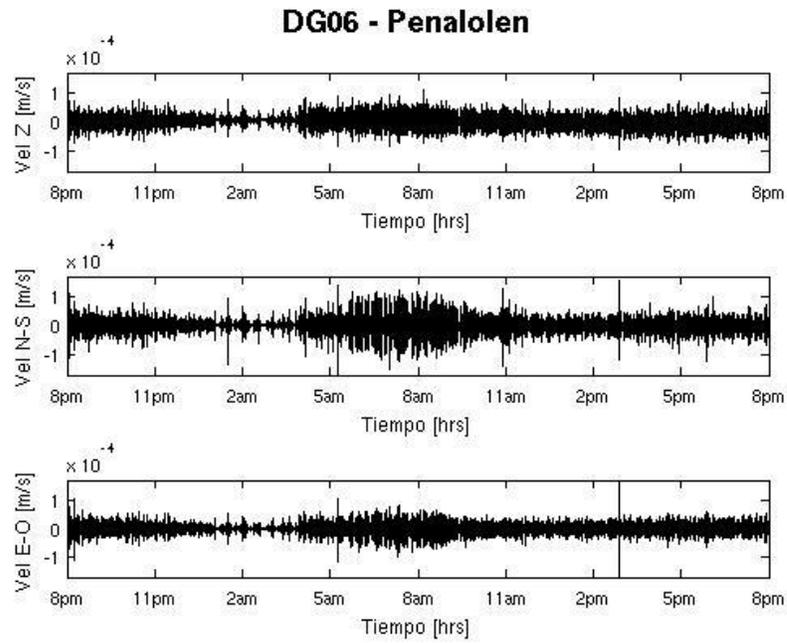


Figura 2.4 Registros del día 8 de Enero del 2014 de la Estación DG06 - Penalolen sin Filtrar ni Corregir

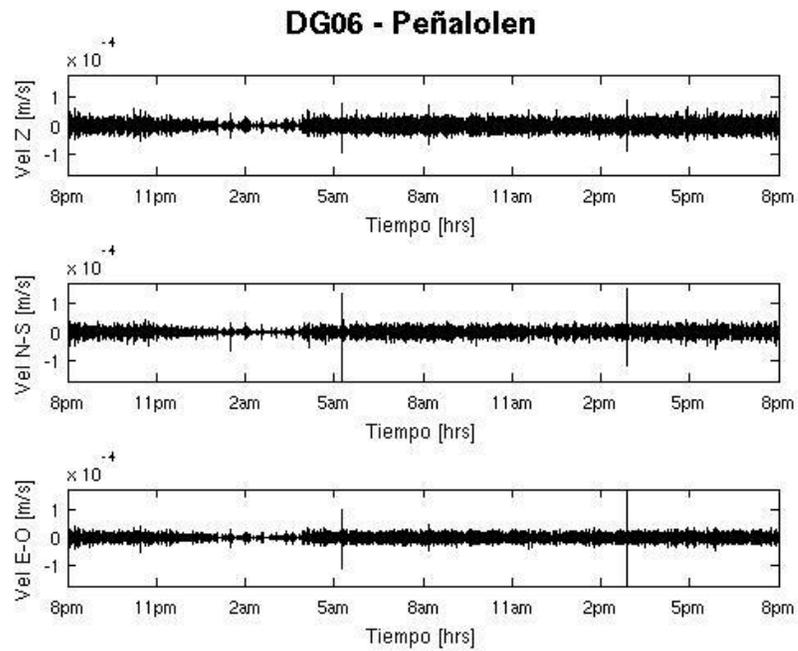


Figura 2.5 Registros del día 8 de Enero del 2014 de la Estación DG06 - Penalolen Filtrado y Corregido

2.6. Comentarios y Conclusiones

El arreglo denso usado en esta memoria permite contar con estaciones en las diferentes comunas del gran Santiago lo cual proporciona la información necesaria para poder estudiar las características geotécnicas de los distintos sitios, y así poder relacionarlas con las razones espectrales y los parámetros dinámicos que se puedan obtener al analizar los registros provenientes de los instrumentos de cada estación sismológica.

El registro en tiempo continuo de 26 sitios por más de 8 meses proporciona una gran base de datos que permite realizar diferentes tipos de análisis. En este trabajo se enfocará en las razones espectrales utilizando una ventana temporal simultánea para todas las estaciones, para de esta forma verificar cómo estas razones varían en el tiempo y determinar si existen factores externos que afecten la forma de la razón espectral.

Es importante entonces verificar el correcto funcionamiento de los instrumentos y la recepción de la información que éstos entregan ya que las mediciones son muy sensibles a cualquier movimiento o perturbación. Gran parte de las razones espectrales calculadas se realizan con ruido por lo que los registros que incluyan algún ruido externo, será un registro que no aportara al estudio.

En la misma línea, es necesario procesar los registros antes de analizarlos, quitar la tendencia o el promedio y filtrarlos ayuda eliminar periodos largos que son producto de las variaciones de temperatura que sufren los suelos durante el día.

En cuanto al análisis, se debió elegir el formato más óptimo por la cantidad de datos que tienen las señales. El formato SAC es muy utilizado para estudios sismológicos debido a la forma en que se almacena la información correspondiente, tiempo y magnitud resultando en archivos livianos fácilmente manejables a través del programa Seismic Analysis Code (SAC) donde se pueden filtrar o cortar las señales. Además como se calcularán las razones mediante el software Geopsy® los archivos de extensión .SAC son cargables más rápido que otros formatos y su procesamiento es más veloz.

3. Características de La Cuenca de Santiago

3.1. Introducción

Santiago corresponde a la ciudad más grande de Chile con una población de más de 5 millones de habitantes existiendo alrededor de 40 parques industriales los más relevantes ubicados en la zona norte y poniente de la región. Debido a la alta densidad de habitantes, gran parte de la cuenca posee una superficie del tipo urbana. (Varela, 1991)

La cuenca de Santiago tiene una extensión aproximada 35 [km] de ancho Este-Oeste y una longitud aproximada de 80 [km] en dirección Norte-Sur. Ubicada en la parte norte de la Depresión Central entre la Cordillera de la Costa y la Precordillera Andina, delimitada hacia el norte por el cordón montañoso de Chacabuco y hacia el sur por los cerros de Angostura (Karzulovic,1958).

El relieve de la cuenca en toda su extensión es bastante plano con pendientes muy suaves con alturas que van desde los 450 hasta los 700 m.s.n.m. Existen algunos afloramientos rocosos aislados como los cerros Santa Lucia, San Cristobal, Renca etc., los que pueden alcanzar alturas de 905 m.s.n.m. mientras que los cerros de la cordillera de los Andes que la rodean superan en muchos casos los 3000 m.s.n.m como el Cerro San Ramón (Thiele, 1980).

La profundidad del basamento rocoso de la cuenca posee una geometría muy irregular con profundidades variables que van desde unos 200 metros en gran parte de la cuenca hasta 500 m en sectores de Pudahuel, Lampa y Peñalolen (Araneda et al, 2000). En la Figura 3.1 se muestran las isopacas de la profundidad del basamento con respecto a la superficie

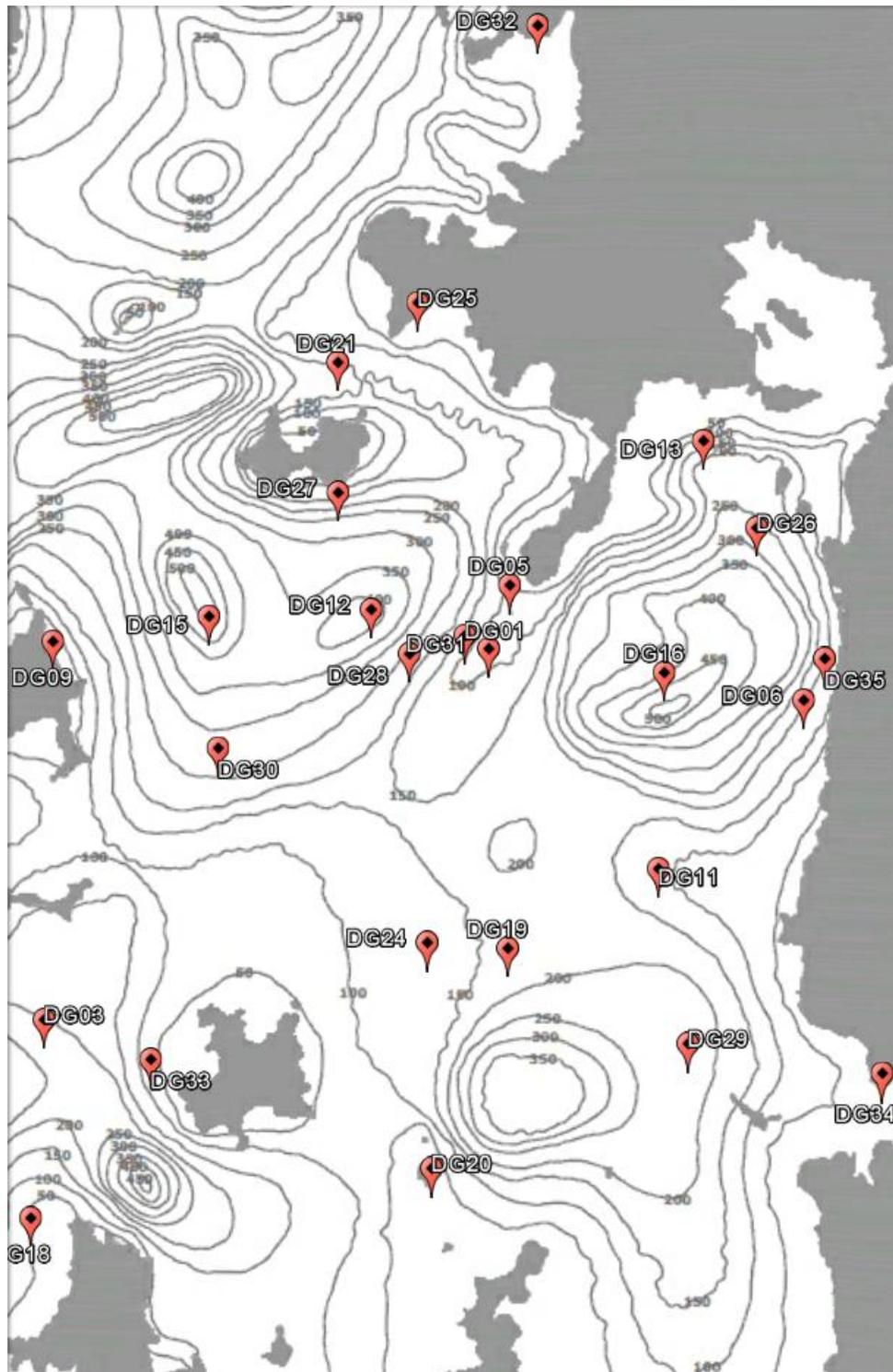


Figura 3.1 Isopacas de la profundidad del basamento rocoso según Araneda et al, (2000). Las zonas coloreadas de gris representan afloramientos rocosos, mientras que las curvas del mismo color son las isopacas de la profundidad del basamento con respecto a la superficie. Los marcadores rojos indican la posición de las estaciones.

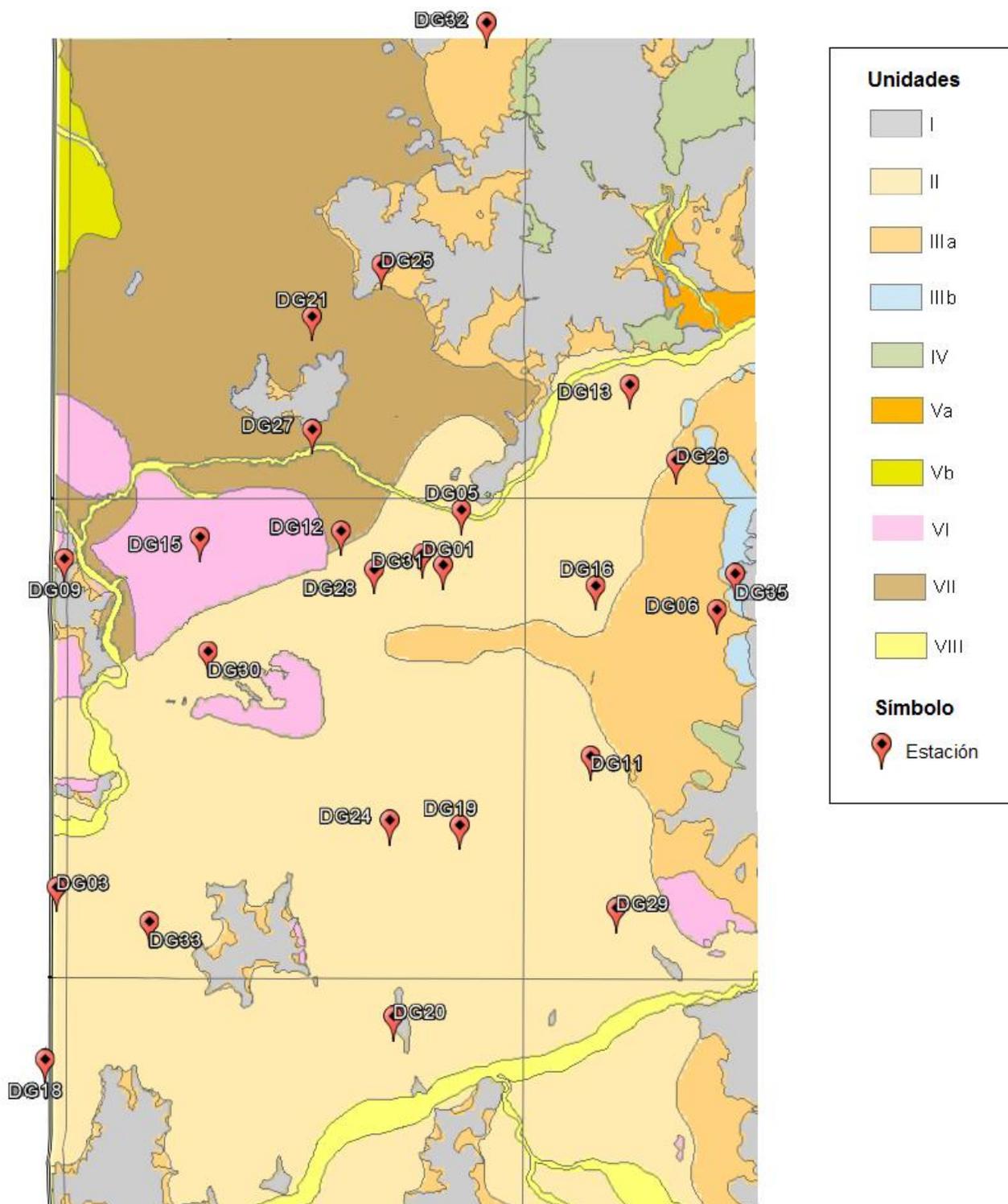


Figura 3.2 Unidades de la Cuenca de Santiago según Leyton et al, (2011). Los marcadores rojos indican la posición de las estaciones. Las zonas coloreadas indican la unidad geológica descrita por Leyton et al en "Zonificación sísmica de la cuenca de Santiago, Chile", 2011. En esta memoria se utilizan las siguientes: I. Roca Basal, II. Gravas de Santiago, IIIa Depósitos de Conos de Deyección, VI Depósitos de Cenizas Volcanicas Pumitas y VII Finos del Norte de Santiago

3.2. Depósitos y suelos de la cuenca de Santiago

Las unidades propuestas por Leyton et al. (2011) mostradas en la Figura 3.2 corresponden distintos depósitos encontrados en la cuenta. La posición de las estaciones sismológicas de este estudio, se observa que las principales unidades en donde se tienen registros corresponden a las unidades I, II, IIIa, VI y VII.

A partir de información geológica proveniente de otros estudios (Valenzuela, 1978; Karzulovic, 1958), de la clasificación descrita por Pasten (2007) y de la zonificación propuesta por Leyton et al., (2011), se describen algunas de las principales características de los depósitos que tienen injerencia en este estudio, mencionadas en el párrafo anterior.

I. Roca Basal

Se encuentra en las cadenas montañosas de la cuenca de Santiago, los Andes y de la Costa. Además aflora en cerros aislados Chena, Santa Lucía, Renca, y otros. Según Fock (2005), hacia los afloramientos noreste y este son principalmente rocas de la Formación Abanico, invadido por las rocas ígneas. El norte y oeste está dominado por rocas más antiguas, asignadas a las formaciones y cuerpos intrusivos del Cretácico de Lo Valle, Veta Negra y Lo Prado.

II. Gravas de Santiago

Estos depósitos aluviales sedimentarios se originados principalmente por la acción de los ríos Mapocho y Maipo. Corresponden al tipo de suelo con mayor extensión en la cuenca, abarcando los sectores centro, Este y Sur de la misma teniendo como limite al Norte la zona aledaña al Cerro Renca y hacia el Sur el sector del Zanjón de La Aguada, al oriente su límite es la Cordillera de Los Andes en el sector de Lo Barnechea, mientras que su extremo occidental se encuentra en la zona de Pudahuel y Maipú.

Estos depósitos son compactos, compuestos principalmente por sedimentos de grano grueso gravas y bolones, inmersos en una matriz arenosa fina a gruesa densidad media a alta, con contenidos variables de arenas, limos, arcillas y cenizas volcánicas.

IIIa. Depósitos de Conos de Deyección

Corresponden a materiales arrastrados por flujos ocasionales de agua y depositados en forma de cono por acción gravitacional en la salida de las quebradas que drenan la vertiente occidental de la Cordillera de Los Andes y la oriental de la Cordillera de la Costa.

Las partículas de estos depósitos están inmersas en una matriz de finos con una cantidad variable de arena y en menor medida grava. En la parte superior predominan las partículas gruesas decreciendo su granulometría hacia la parte inferior del depósito. Poseen una importante presencia de suelos arcillosos y se encuentran endentados irregularmente con gravas del río Mapocho y presentan apariciones esporádicas de canales de gravas.

VI. Depósitos de Cenizas Volcánicas Pumitas

Se encuentran principalmente en el borde occidental de la cuenca en la Ignimbrita Pudahuel, en las comunas de Pudahuel, Maipú, Cerrillos, Lo Prado y en las rinconadas de Lo Aguirre, Maipú y Padre Hurtado. Además está presente en parte del sureste de la cuenca en parte de la comuna de Puente Alto.

Estos corresponden a depósitos de ceniza volcánica originadas por flujos piroclásticos que rellenaron la cuenca (Stern et al., 1984) y, posteriormente, fueron erosionados y redepositados por actividad fluvial. Estos depósitos residuales se componen principalmente de pequeñas partículas de vidrio volcánico, fragmentos de piedras pómez y fragmentos aislados de rocas volcánicas.

VII. Finos del Norte de Santiago

Estos depósitos se encuentran ubicados en el sector Noroeste de la cuenca, hacia el norte se extienden hasta los sectores de Colina y Batuco. En la zona sureste, se encuentran sobre los depósitos de cenizas volcánicas pumicíticas, en el sector de Pudahuel.

Estos sedimentos están constituidos principalmente por lentes de limos y arcillas de baja consistencia, ricos en arcillas expansivas de alta plasticidad. Además, presentan algunos lentes de poco espesor de arena fina limosa, grava y ceniza volcánica.

3.3. Velocidad de Propagación de la Onda de Corte de los depósitos y suelos de la cuenca de Santiago

Leyton et al., (2011) determinó los valores mínimos de la velocidad de propagación de la onda de corte V_{s30} para las unidades establecidas. Es importante recalcar que este parámetro es el promedio de la velocidad de onda de corte V_s en los primeros 30 [m] de profundidad.

En la Tabla 3.1 se presentan los valores de velocidad de onda de corte estimadas para las unidades en estudio (Ponce, 1998; DS 61,2011). En general la propagación de la onda S aumenta con la profundidad.

Tabla 3.1 Velocidades Mínimas de Onda de Corte

Unidad	V_{s30} [m/s]
IIIa, VI y VII	150 - 400
II	400 - 800
I	< 900

3.4. Comentarios y Conclusiones

Como se mencionó en la introducción, el periodo fundamental del suelo es proporcional a la razón entre la profundidad del basamento y la velocidad de onda corte V_s . El primer parámetro está determinado por condiciones topográficas y geomorfológicas, de la Figura 3.1 se puede desprender la irregularidad de la profundidad del basamento con respecto a la superficie (Araneda et al., 2000). Por lo tanto este no sigue una pendiente representativa por lo que es difícil seguir una comparación entre la profundidad de los estratos ya que en un mismo depósito se encuentran profundidades muy variables.

Con respecto a la velocidad de propagación de ondas S en los primeros 30 [m], se tiene un rango considerable amplio para las unidades, por lo que este parámetro da una noción de cómo es la impedancia de los depósitos en donde claramente los suelos más blandos poseen una velocidad de propagación menor, también podría implicar no sólo variaciones en la velocidad sino también en la forma con que esta se propaga, entendiendo que un suelo con mayor impedancia hará que la onda se modifique más.

Es razonable pensar que la V_{s30} es un valor constante para un mismo tipo de depósito, por lo que se podría esperar que las razones espectrales arrojaran periodos fundamentales similares, sin embargo dada la gran irregularidad de la profundidad del basamento, tomando la relación de la ecuación 1.1 se podrían tener periodos distintos en sitios correspondientes a un mismo depósito.

En cuanto a las características geotécnicas de los distintos suelos, la cuenca de Santiago cuenta con un abanico muy variado de depósitos lo que permitiría poder estimar diferencias entre los parámetros dinámicos de distintos suelos, o poder verificar que las razones espectrales sean similares para sitios con similares características.

A grandes rasgos se podría separar la cuenca en dos tipos de depósitos, uno correspondiente a la zona norponiente de la cuenca caracterizado principalmente finos representando un depósito menos competente, mientras que el resto de la cuenca está enmarcada en un suelo más grueso lo que representa depósitos más rígidos (Bonneyoy-Claudet et al, 2009).

4. Razón espectral superficial entre las componentes horizontal y vertical (H/V) usando el software Geopsy®.

4.1. Introducción

A raíz de los registros de movimiento en varios lugares de Japón se observó que en los suelos blandos, el movimiento horizontal es mayor que el movimiento vertical, es decir en general las componentes horizontales muestran valores más altos que la componente vertical, mientras que en los suelos duros, ambos movimientos, horizontal y vertical son similares entre sí tanto en los valores máximos como en la forma de onda (Nakamura, 1989).

Dadas las ondas sísmicas de cuerpo (P y S) y las superficiales (Rayleigh y Love), Nakamura propuso que los movimientos de las componentes horizontales son amplificadas por las múltiples cambios de dirección de las ondas S al llegar a la superficie de los estratos de suelo por donde se propaga, mientras que los movimientos registrados en la vertical sufren el mismo efecto producido en este caso por las ondas P, como se ilustra en la Figura 4.1 dado que las ondas S producen esfuerzos de cizalle y las ondas P esfuerzos de compresión/tracción.

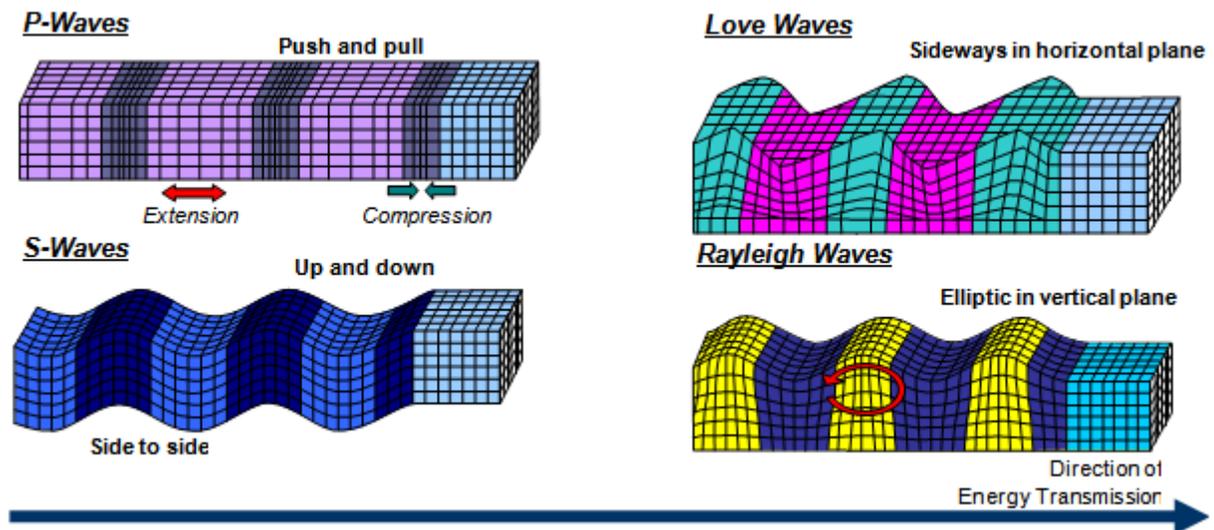


Figura 4.1 Efectos Mecánicos de las Ondas Sísmicas. Pardo, 2012

También se reconoce que las ondas Rayleigh correspondidas con un movimiento elíptico retrogrado (Figura 4.1) se aprecia en todas las componentes, por lo que la amplificación de su efecto (H y V) puede ser cuantificado con la razón entre los espectros (A) de los movimientos de la superficie (S) y del basamento (B) del estrato siguiente (Nakamura, 1989) se tiene:

$$H = \frac{A_{HS}}{A_{HB}} \quad (4.1.)$$

$$V = \frac{A_{VS}}{A_{VB}} \quad (4.2.)$$

Luego la razón H/V

$$\frac{H}{V} = \frac{\frac{A_{HS}}{A_{HB}}}{\frac{A_{VS}}{A_{VB}}} = \frac{A_{HS} A_{VB}}{A_{VS} A_{HB}} \quad (4.3.)$$

Dado que el basamento corresponde generalmente a roca dura, ésta se comporta como suelo duro por lo que el cociente que refiere al basamento tiende a 1.

$$\frac{A_{VB}}{A_{HB}} \approx 1 \quad (4.4.)$$

Por lo que

$$\frac{H}{V} \approx \frac{A_{VB}}{A_{HB}} \quad (4.5.)$$

En los puntos siguientes se muestra el procedimiento para obtener el H/V de los registros con el programa Geopsy®.

4.2. Razón espectral entre las componentes horizontal y vertical (H/V) usando el Software Geopsy®

Geopsy® es un programa que permite calcular las razones espectrales de las señales ingresadas de una manera bastante simple para el usuario, sin embargo hay que definir algunos inputs para poder analizar correctamente los registros y así obtener resultados razonables, dado que las razones espectrales se calculan a partir de los espectros, se deben tener las mismas consideraciones para su cálculo.

Uno de los parámetros principales es determinar las ventanas temporales de la señal que serán utilizadas y el tamaño de estas. Una ventana se define como la multiplicación de una parte de la señal por una función suave y nula en los extremos, y así evitar aparición de altas frecuencias producidas por el corte abrupto de la señal al inicio y al final. En cada ventana se calculan los espectros y luego las razones espectrales, luego se calcula una curva promedio y un error asociado. Se debe tener cuidado que el largo de la ventana debe ser acorde al rango de frecuencias que se busca interpretar, en este caso la frecuencia mínima mostrada es de 0.2 [hz] lo que representa un periodo máximo mostrado de 5 [seg] por lo que se eligió un largo de ventana L_w de 60 [seg].

El criterio de selección de ventanas de ruido blanco se hace en definición los términos STA y LTA . STA es la amplitud promedio de la señal en un período corto de tiempo, $tsta$, y LTA es la amplitud promedio de la señal en un período más largo de tiempo, $tlta$. El proceso de selección de ventanas se basa en la comparación de la razón STA/LTA con valores umbrales máximo, S_{max} , y mínimo, S_{min} , definidos de antemano, al igual que un porcentaje de traslape (Pasten, 2007).

Para seleccionar una ventana de vibraciones naturales estacionarias se toma una parte de la señal de largo $tlta$, en este caso igual al largo de la ventana L_w , y se calcula LTA . Posteriormente una ventana móvil de largo $tsta$ recorre el intervalo definido por $tlta$ de principio a fin y va calculando instantáneamente STA . Si la razón STA/LTA se enmarca dentro de los valores umbrales, S_{max} y S_{min} , durante todo el recorrido de la ventana móvil, esa parte de la señal será considerada como una ventana apropiada para el cálculo de razones espectrales de la segunda etapa (Pasten, 2007).

En la Tabla 4.1 se pueden observar los criterios ingresados, en la Figura 4.2 las ventanas seleccionadas para un registro típico de 4hrs y la Figura 4.3 muestra el resultado de la razón espectral.

Tabla 4.1 Criterios de selección de ventanas ingresados a Geopsy

Parámetro	Símbolo	Valor
Largo de ventanas LV	LV	60 [s]
Tiempo de la ventana corta STA	t_{STA}	1 [s]
Tiempo de la ventana Larga LTA	t_{LTA}	60 [s]
Mínimo valor del cociente STA/LTA	$(STA/LTA)_{min}$	0.2
Máximo valor del cociente STA/LTA	$(STA/LTA)_{max}$	2.5
Coefficiente de ancho de banda	b	40

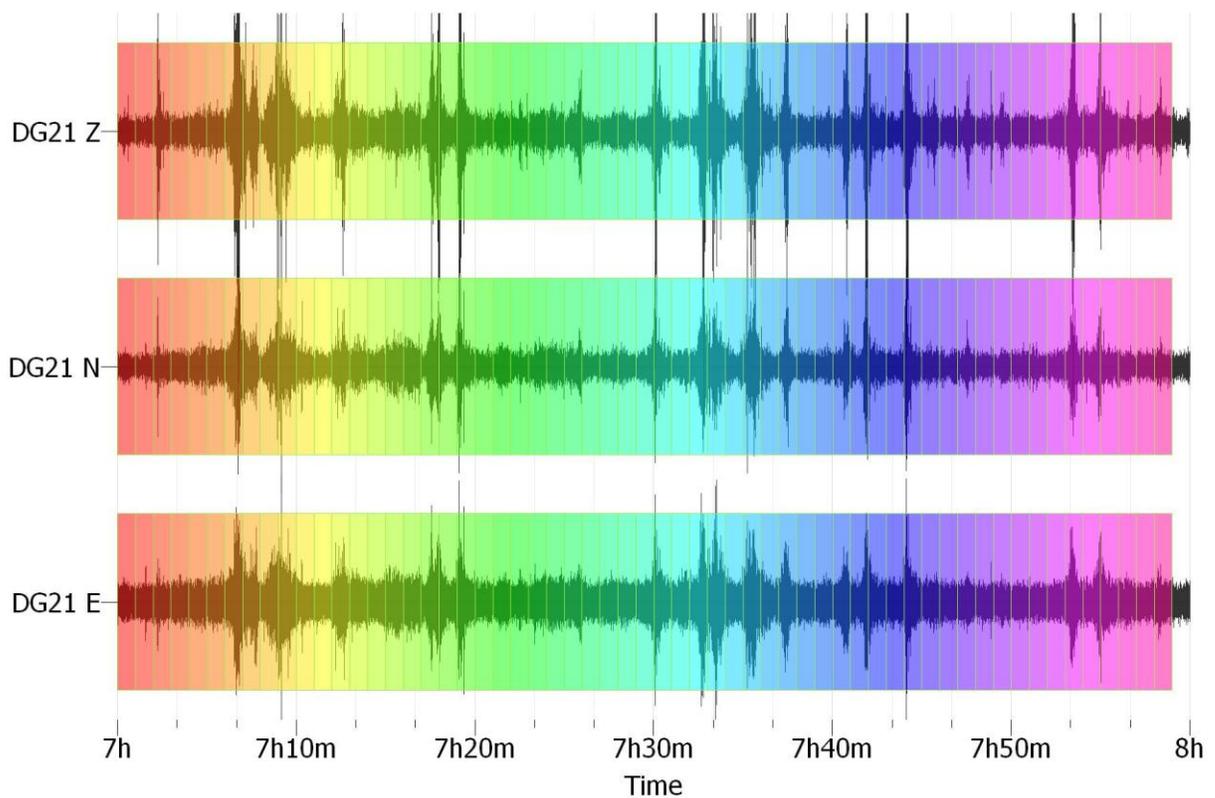


Figura 4.2 Ventanas seleccionadas para el registro desde las 7 horas hasta las 8hrs en horario universal del día 9 de Enero de la estación DG21 – Quilicura. Cada color representa una ventana de 60 s.

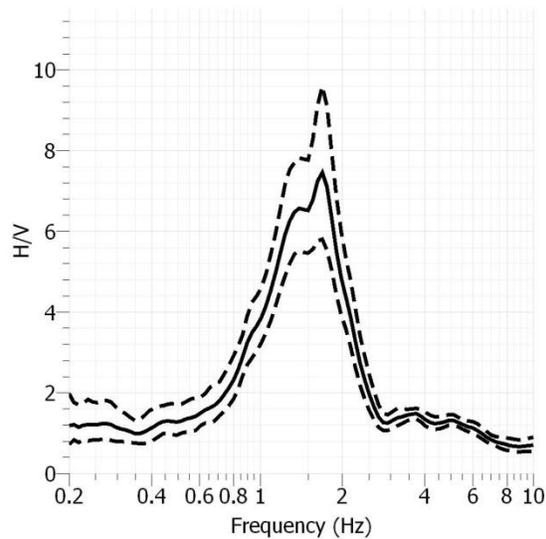


Figura 4.3 Razón espectral resultante de la señal mostrada en la Figura 4.2 proporcionada por Geopsy, la curva continua representa el promedio, mientras de las segmentadas la dispersión producto de calcular la razón espectral para todas las ventanas seleccionadas.

4.3. Comentarios y Conclusiones

La razón espectral representa una técnica bastante sencilla para poder estimar las características dinámicas del sitio que se analice. Esta nace de observaciones que pueden resultar muy engorrosas debido a la naturaleza visual de los registros, por lo tanto cuantificar el parecido entre los registros en las diferentes coordenadas del espacio, se realiza de manera bastante simple como lo es la razón entre la horizontal y la vertical. Además acudir a los espectros de los registros es de gran ayuda para poder determinar parámetros dinámicos que se pueden obtener de manera visual, así que la razón espectral muestra ser una técnica confiable.

El programa Geopsy® es una muy buena herramienta para calcular la razón espectral debido a que incorpora los criterios de selección de ventanas con inputs que el usuario debe especificar, lo que ayuda a un buen análisis y a manejar las variables de éstas como se estimen convenientes. En este sentido, quien utilice el programa debe tener el conocimiento para poder especificar los parámetros mencionados en este capítulo.

5. Estimación de Periodos Fundamentales del Suelo en los Sitios donde hay Estaciones de Intervención

5.1. Introducción

La vibración dinámica de un suelo producto de un sismo presenta con una amplificación de las ondas sísmicas caracterizada por las propiedades del estrato por donde se propagan las ondas (Kanai, 1956, 1957). El argumento para encontrar el periodo fundamental usando el método de Nakamura es la consideración de que las fuentes generadoras de ruido o vibraciones naturales y sismos producen una sollicitación dinámica aleatoria, por lo cual un depósito de suelo tiende a vibrar mayormente de acuerdo a su periodo fundamental, que se evidencia en los peak de las curvas de los H/V que muestra que dicha frecuencia tiene un factor de amplificación mayor (Lachet et al., 1996).

Como también se expuso en el acápite 4.1. las diferencias entre las formas y amplitudes de los registros depende del tipo de suelo, por lo que es de esperar que un suelo menos rígido muestre un H/V con un peak y un suelo más rígido tenga una razón espectral plana para todo el rango de frecuencias estudiado (Bonney-Claudet et al, 2009). En la literatura existen algunos trabajos que han presentado clasificaciones de las razones espectrales para la cuenca de Santiago como Pasten (2007) y Leyton et al., (2011), aunque en esta memoria la clasificación propuesta es diferente a las descritas por dichos autores, el criterio de selección es similar y corresponde a la forma que se presenta la curva obtenida para la razón espectral.

En los puntos siguientes se procede a mostrar los resultados al aplicar la razón espectral a los registros provenientes de las estaciones instaladas en la cuenta de Santiago.

5.2. Razones Espectrales para los Sitios donde hay Estaciones Sismológicas

Se escogió un mismo periodo temporal para todas las estaciones que corresponde al día juliano 9 del año 2014 con un rango comprendido desde las 0:00 [hrs] hasta las 4:00 [hrs], tiempo que corresponde al horario universal. La zona horaria de Santiago corresponde GTM-4 por lo que en tiempo local corresponde al tiempo entre las 20:00 [hrs] y 24:00 [hrs] del 8 de Enero del 2014.

Los registros fueron ajustados según el acápite 2.5 y procesados con el software Geopsy® como se indicó en el punto 4.2. con lo que se obtuvo una curva promedio de H/V y su dispersión.

5.2.1. Clasificación de los H/V

Dadas las formas de las curvas de la razón espectral H/V obtenidas para los sitios de las estaciones, se proponen cuatro grupos:

- **Planos**, aquellos con amplitudes menores a 2 en donde no es posible identificar un peak en la razón espectral H/V (ver Figura 5.1 y Figura 5.2).
- **Con Peak Somero**, aquellos en donde la razón espectral H/V es mayormente plana, pero es posible identificar un peak predominante de amplitud cercana a 2 (ver Figura 5.3).
- **Con Peak Marcado**, aquellos en donde se identifica uno o más un peak predominantes en donde alguno alcanza amplitud superior a 2, pero inferior a 3 (ver Figura 5.4).
- **Con Peak muy Marcado**, aquellos en donde se identifica uno o más un peaks predominantes en donde alguno alcanza una amplitud superior a 3 (ver Figura 5.5).

- **Espectro Planos**

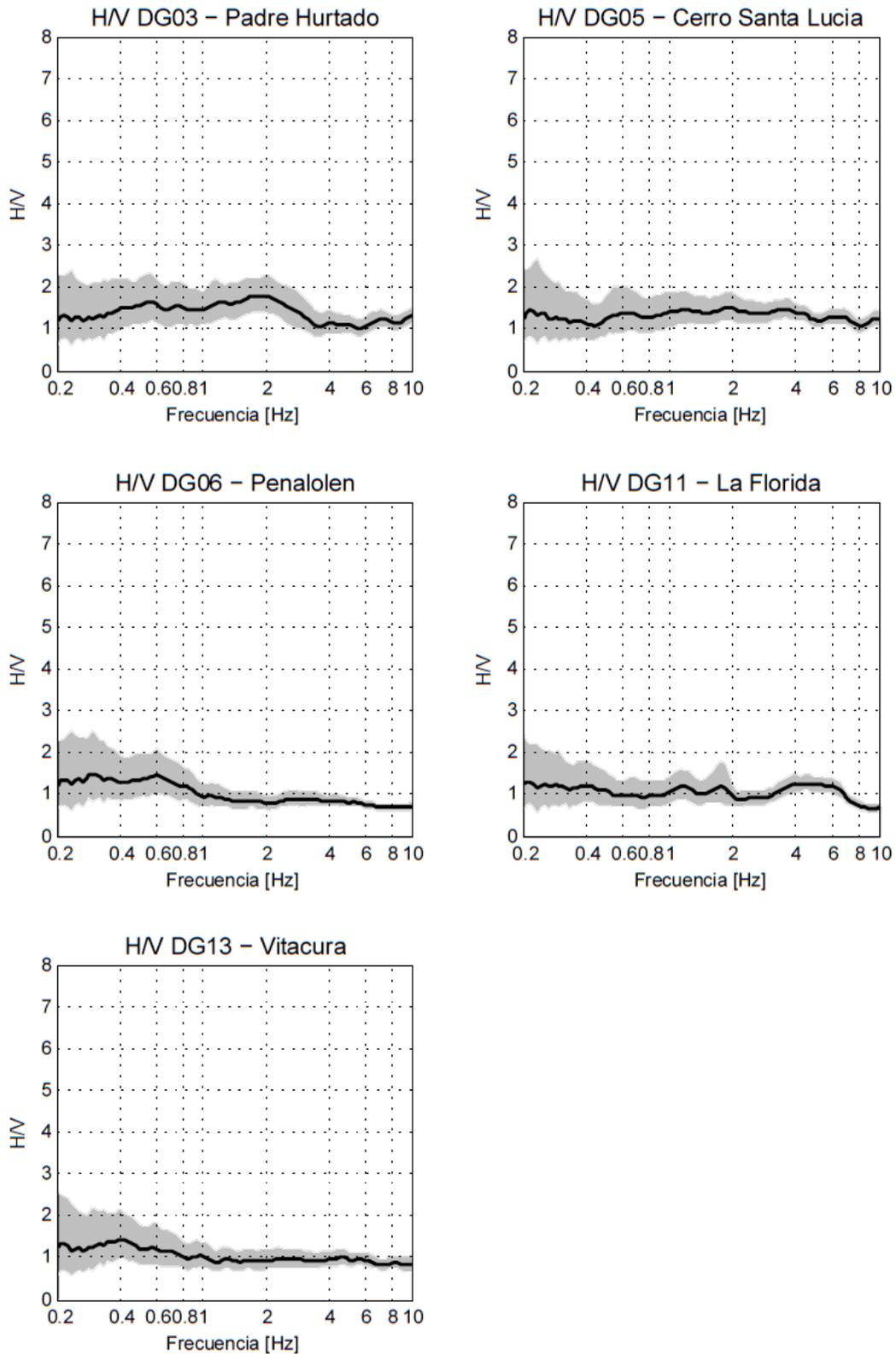


Figura 5.1 Razones Espectrales Planas. La curva de color negro es el H/V promedio y la zona de color gris claro es la dispersión asociada.

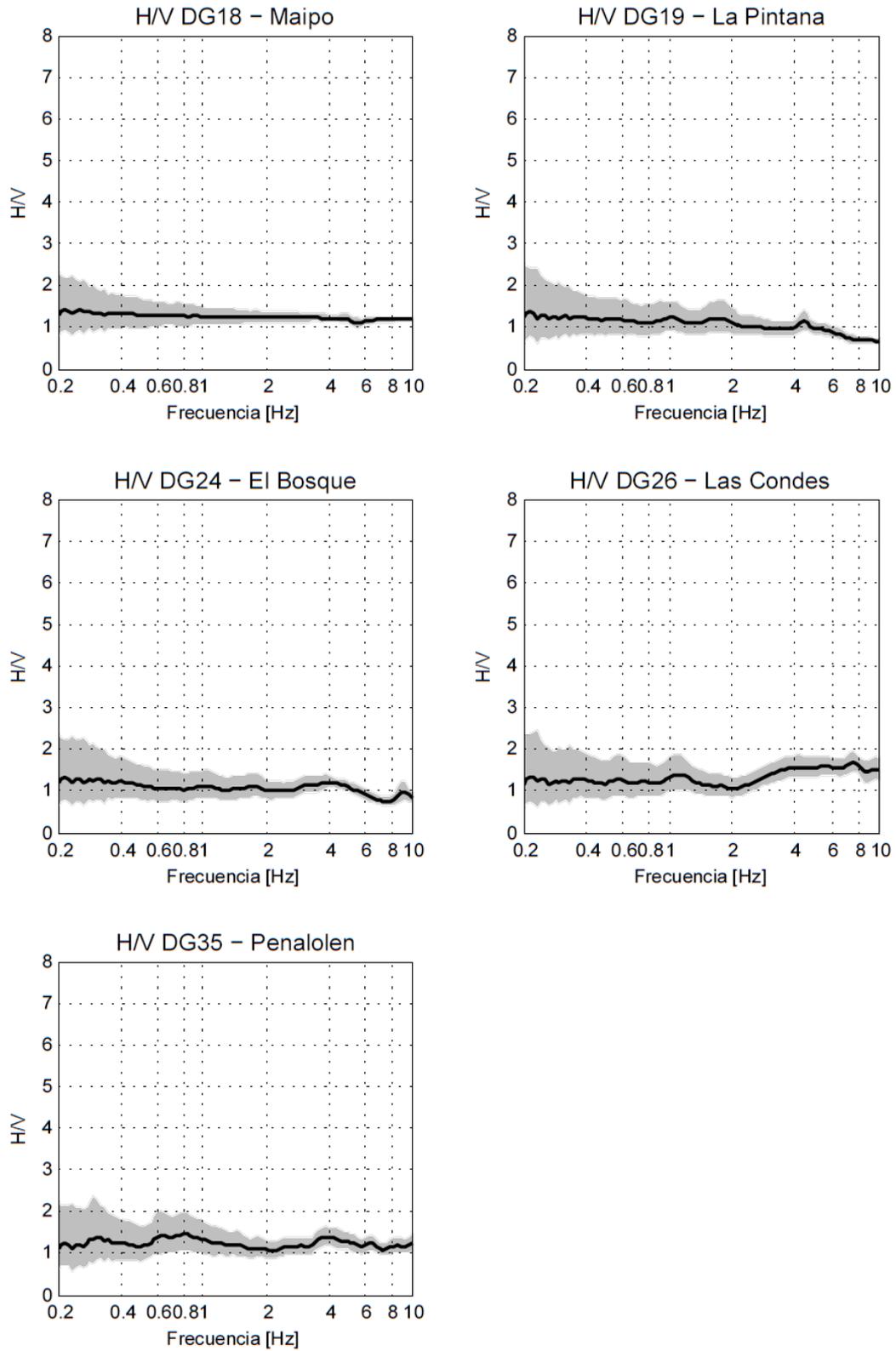


Figura 5.2 Razones Espectrales Planas. La curva de color negro es el H/V promedio y la zona de color gris claro es la dispersión asociada.

- **Espectro Con Peak Somero**

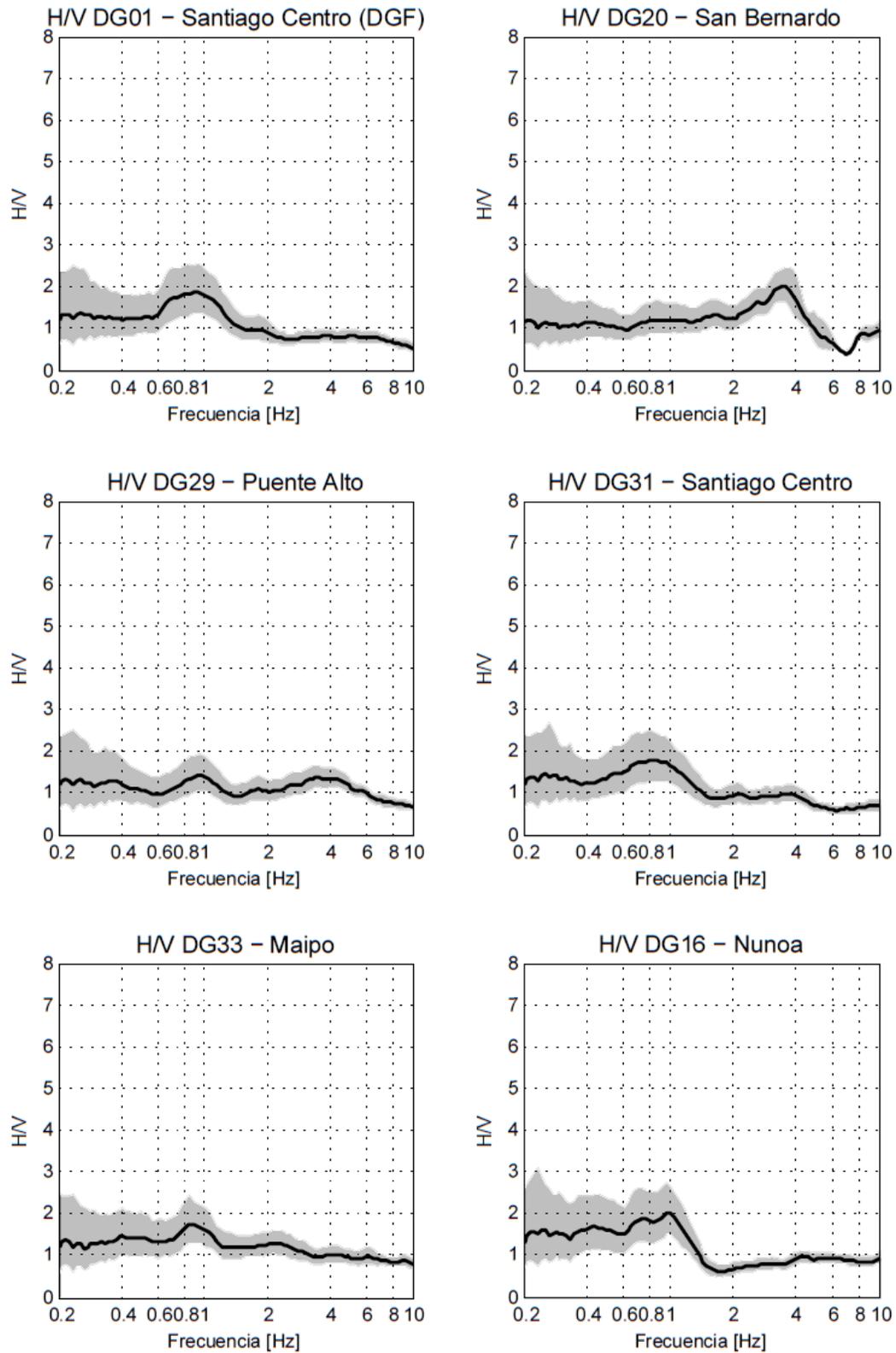


Figura 5.3 Razones Espectrales con Peak Somero. La curva de color negro es el H/V promedio y la zona de color gris claro es la dispersión asociada.

- **Espectro Con Peak Marcado**

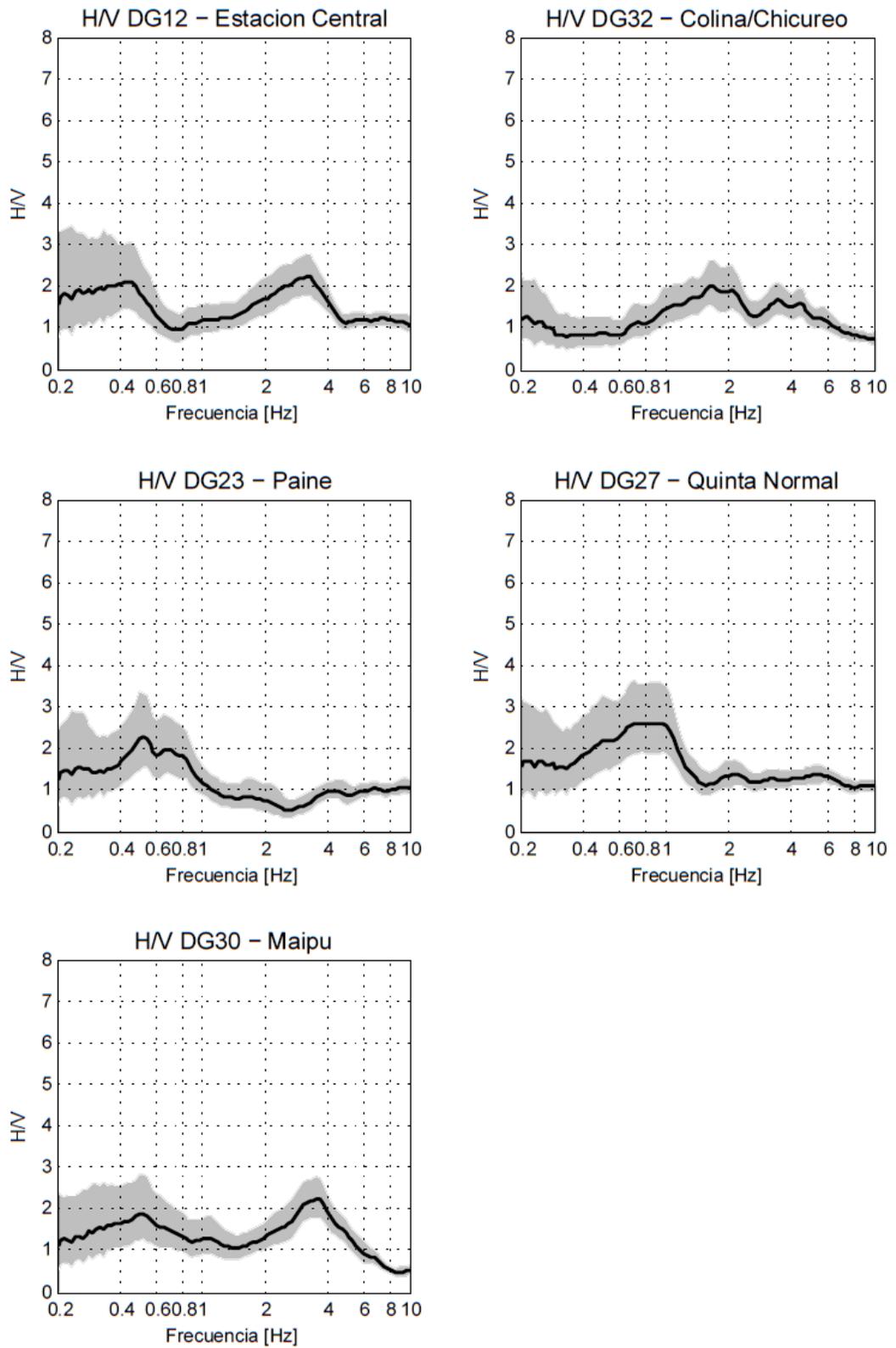


Figura 5.4 Razones Espectrales con Peak Marcado. La curva de color negro es el H/V promedio y la zona de color gris claro es la dispersión asociada.

- **Espectro Con Peak Muy Marcado**

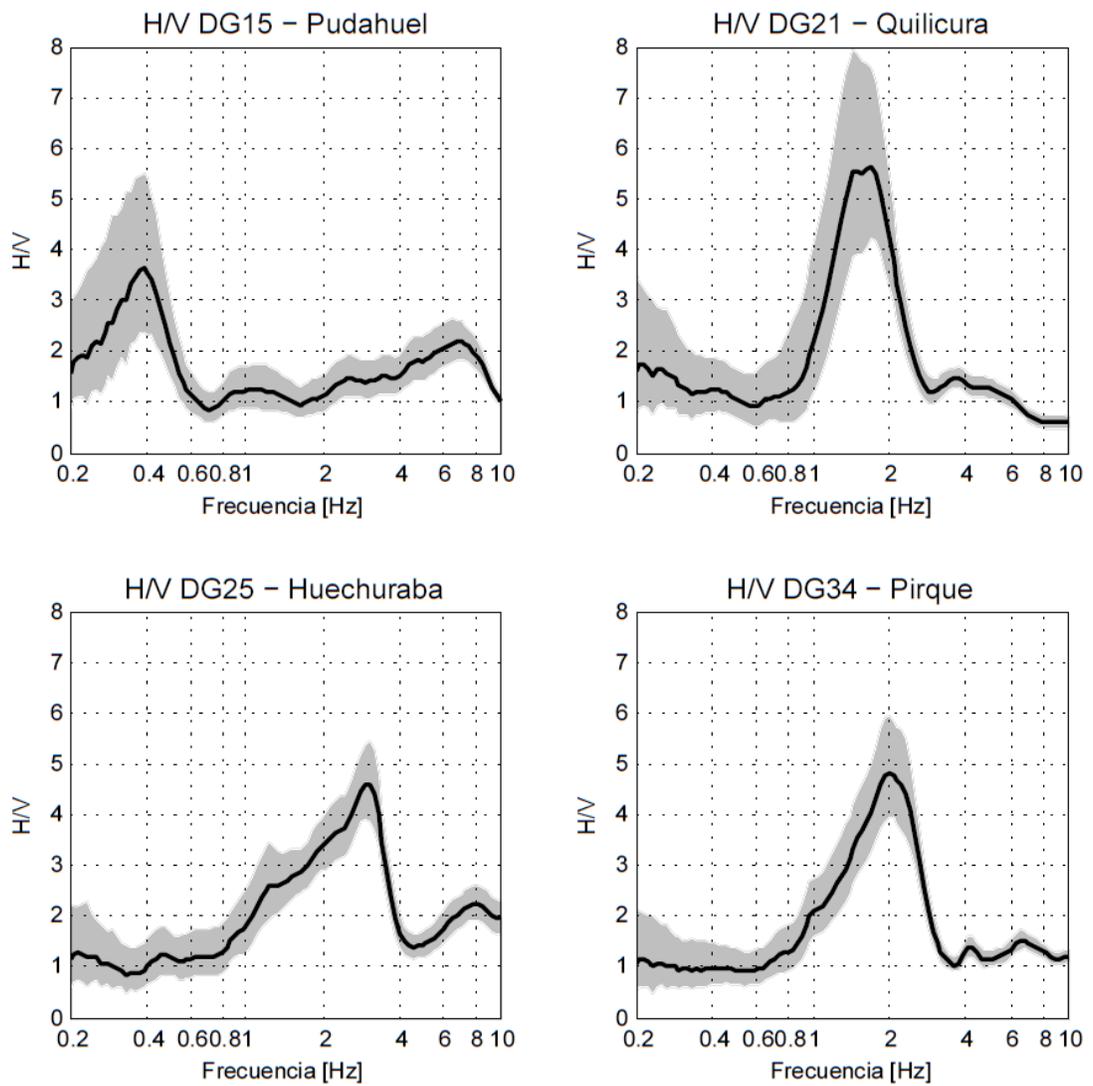


Figura 5.5 Razones Espectrales con Peak Muy Marcado. La curva de color negro es el H/V promedio y la zona de color gris claro es la dispersión asociada.

5.2.2. Periodos Fundamentales

Como se expuso en la introducción del capítulo, relacionando el valor espectral máximo de la curva H/V se puede obtener la frecuencia natural de oscilación y con el recíproco de ella, el periodo fundamental del sitio. Es importante recalcar que para las curvas planas no se puede distinguir una frecuencia fundamental por lo que para este tipo no se calculó un periodo natural.

En las Tablas 5.1 a la 5.3 se muestran los resultados obtenidos para los distintos tipos de razones espectrales.

Tabla 5.1 Periodos Naturales H/V con Peak Somero

Nombre	Comuna	H/V max	ω_n [Hz]	Tn [s]
DG01	Santiago	1,88	0,93	1,07
DG20	San Bernardo	2,01	3,58	0,28
DG29	Puente Alto	1,42	0,97	1,03
DG31	Santiago	1,78	0,80	1,25
DG33	Maipo	1,76	0,86	1,16

Tabla 5.2 Periodos Naturales H/V con Peak Marcado

Nombre	Comuna	H/V max	ω_n [Hz]	Tn [s]
DG12	Estacion Central	2,23	0,44	2,27
DG16	Ñuñoa	2,02	0,97	1,03
DG23	Paine	2,29	0,52	1,94
DG27	Quinta Normal	2,61	0,93	1,07
DG30	Maipú	2,24	0,52	1,94
DG32	Colina/Chicureo	2,02	1,62	0,62

Se debe hacer hincapié en que en los H/V con peak marcado la DG12, la DG30 y la DG32 (ver Figura 5.4) presentan dobles peak, en las tablas se muestra el periodo asociado al primer peak, es decir el peak asociado a la menor frecuencia.

Tabla 5.3 Periodos Naturales con Peak Muy Marcado

Nombre	Comuna	H/V max	ω_n [Hz]	Tn [s]
DG15	Pudahuel	3,63	0,39	2,55
DG21	Quilicura	5,65	1,69	0,59
DG25	Huechuraba	4,60	3,06	0,33
DG34	Pirque	4,83	1,98	0,51

La ecuación 1.1. con n igual a 1, representa el primer modo de vibración, por lo que el periodo asociado a n igual 1 es el periodo natural de vibración con lo que dicha ecuación queda:

$$T_n = \frac{4H}{V_s} \quad (5.1.)$$

Tomando los periodos resultantes y H igual a la profundidad determinada a partir de la Figura 3.1, se puede corroborar la información de la velocidad de onda de corte para los sitios de las estaciones estudiadas, despejando V_s de la ecuación 5.1, los valores estimados de V_s se presentan en la Tabla 5.4.

$$V_s = \frac{4H}{T_n} \quad (5.2.)$$

Tabla 5.4 Profundidad del Basamento y Velocidades de Onda de Corte para las Estaciones

Nombre	Comuna	Tipo Peak	Tn [s]	H [m]	Vs [m/s]
DG12	Estación Central	Marcado	2,55	350	549
DG16	Ñuñoa	Marcado	1,03	500	1942
DG27	Quinta Normal	Marcado	1,07	250	936
DG30	Maipú	Marcado	1,94	250	516
DG32	Colina/Chicureo	Marcado	0,62	25	161
DG15	Pudahuel	Muy Marcado	2,55	450	706
DG21	Quilicura	Muy Marcado	0,59	150	1017
DG25	Huechuraba	Muy Marcado	0,33	25	303

La Tabla 5.4 se realizó solo para las estaciones que se encontraban dentro del plano de la Figura 3.1, se omitieron los periodos de las estaciones con peak somero ya que las velocidades resultantes no se condicen con los valores esperados para los sitios donde están emplazadas dichas estaciones.

5.3. Comentarios y Conclusiones

Una observación importante que se puede realizar sobre todas las curvas es la forma en que se muestra la dispersión, la que aumenta para frecuencias bajas y disminuye para frecuencias altas, esto se debe a la forma en que se calculan las razones, ya que las frecuencias más bajas están asociadas a periodos más largos lo que implica que no siempre es posible visualizar en las ventanas dicho periodo en su totalidad con lo que para cada ventana se tendrán razones diferentes, aumentando la dispersión asociada. Un efecto contrario ocurre para las frecuencias más altas, éstas al estar asociadas a periodos cortos, en una ventana se puede tener la cantidad suficiente de datos para visualizar el periodo en su totalidad. Es por este motivo que se debe optar por una ventana que mitigue dentro de lo posible este problema, lo que se logra usando un largo de 60 [s].

Las curvas resultantes de la razón espectrales siguen algunos patrones por lo que se propone una clasificación usando la forma de las curvas de ellas. Por ejemplo las razones planas, se mantienen en un vecindario bastante pequeño de amplitudes espectrales H/V igual a 1, no hay razones planas en torno a otro valor, lo que implica que la componente horizontales, no sólo es similar en forma sino también en tamaño respecto de las componentes superficiales, lo que se condice con que en este tipo de razones no exista un periodo predominante. Asimismo las razones espectrales que muestran un peak somero, permanecen predominantemente en la unidad, pero con máximos visibles, que casi no superan H/V igual a 2.

Las razones espectrales con un peak marcado debe ser el grupo que más diferencias muestra, ya que en algunas de ellas incluso es posible identificar un segundo peak; sin embargo a grandes rasgos se puede decir de este grupo no sigue una forma plana, y que sus máximos bordean la amplitud espectral H/V igual a 2. Por otro lado las razones espectrales con un peak muy marcado poseen formas bastante similares entre si y tienen máximos mayores a 2.

El valor de la la frecuencia natural parece no guardar una relación directa con la forma de la razón espectral. En general se puede decir que se cuenta con periodos pequeños del orden esperable para las características de los suelos de la cuenca de Santiago. Asimismo pareciera ser que no se tiene una relación entre la velocidad de onda de corte con el tipo de razón espectral obtenida.

Es importante enfatizar que los resultados de la Tabla 5.4 representan la velocidad promedio de todo el estrato, a diferencia de los valores de la Tabla 3.1 que corresponden a los valores mínimos promedio de los 30 [m] más superficiales, por lo que las únicas estaciones que tienen una profundidad cercana a 30 [m] son la DG25 ($V_s = 303,03$ [m/s]) y DG32 ($V_s = 161,29$ [m/s]) las que están en las unidades IIIa y VII respectivamente (Figura 3.2), ambas unidades fueron descritas con velocidades mínimas entre 150 - 400 [m/s], por lo que la estimación dada por la Tabla 5.4 para dichas estaciones es coherente.

6. Comparación de los Periodos Fundamentales con las Características Geotécnicas con campañas anteriores

6.1. Introducción

En este capítulo se comparan los resultados obtenidos en esta memoria con los resultados de Pasten (2007), para esto se calcularon las distancias entre los sitios medidos en dicha campaña y la ubicación de las estaciones utilizadas en esta memoria encontrándose 6 sitios con distancias de a lo más 800 [m]. En este capítulo se contrastan los datos obtenidos por Pasten (2007) y los de esta memoria para así establecer alguna semejanza predominante.

Como se expuso en el Capítulo 4, las razones espectrales no sólo dan cuenta del periodo fundamental sino que también da cuenta del nivel de la impedancia del depósito por donde se transmiten las ondas sísmicas y con ello cuanta amplificación sísmica que se puede generar producto del efecto de sitio. En base a esto también se pretende realizar una relación entre los resultados de las razones espectrales con el tipo de suelo donde se sitúan las estaciones. Para ello se utiliza la clasificación de los depósitos de la cuenca propuesta por Leyton et al, (2011) mostrada en el Capítulo 3.

6.2. Comparación con las razones espectrales obtenidas por Pasten (2007)

Para realizar esta comparación se contó con toda la base de datos de la ubicación de las medidas realizadas por Pasten (2007). Estas mediciones fueron de alrededor de 15 a 20 minutos y se realizaron durante el año 2006 a distancias del orden de 100 m de las estaciones sismológicas. Se calculó la distancia entre ellas y las estaciones sismológicas del arreglo denso. La gran mayoría no mostró tener alguna medida realizada en un radio menor a 1000 [m], por lo que sólo se utilizaron 6 medidas que están “cercanas” a alguna estación utilizada en esta memoria. La Tabla 6.1 se muestra dichas distancias entre los registros. Es importante destacar que a razón del corto tiempo de registro para los resultados de Pasten (2007) para estas señales se utilizó un largo de ventana de 30 [s]

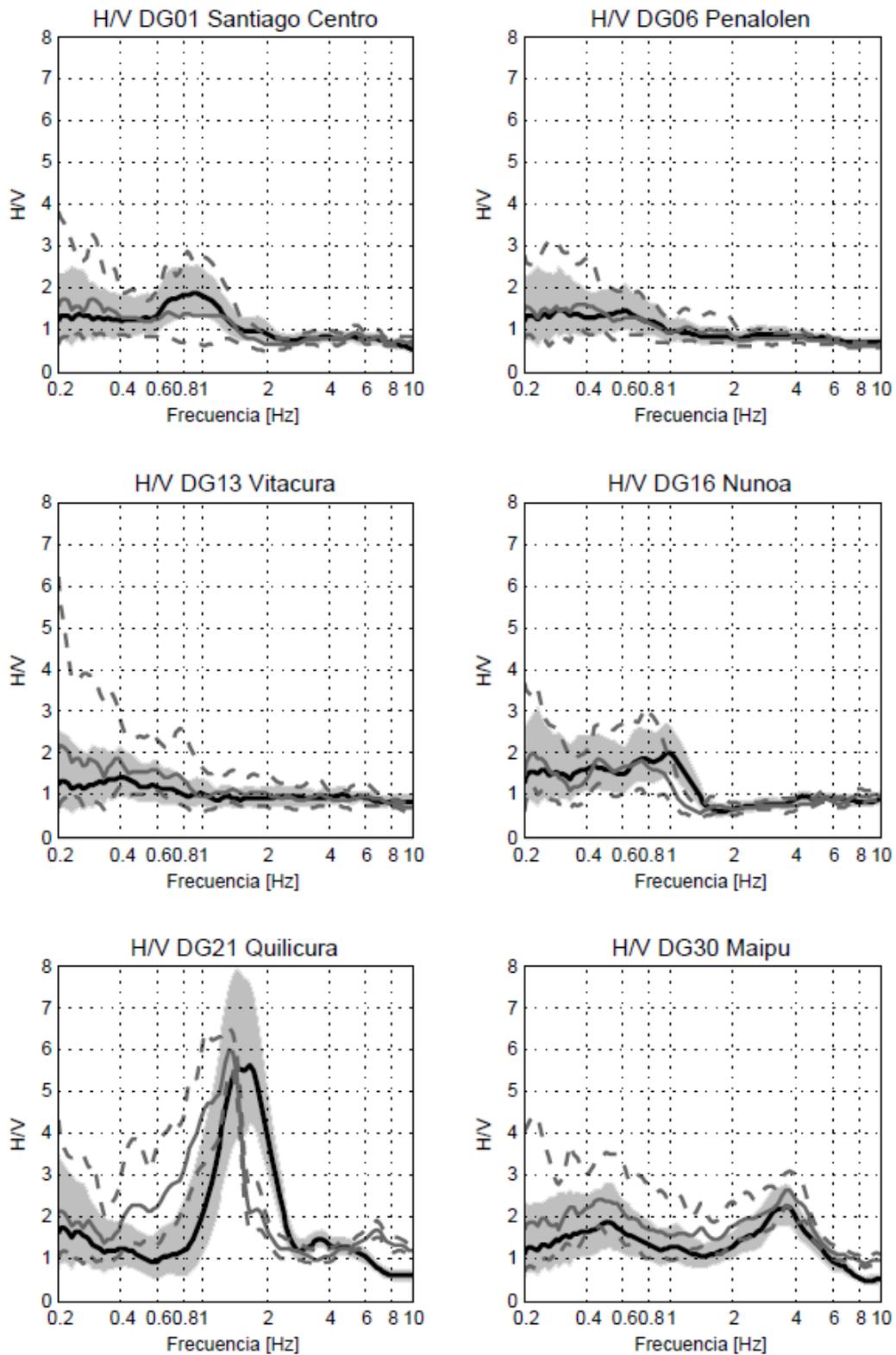


Figura 6.1 Comparación de Razones Espectrales. La curva de color negro es el H/V promedio obtenido y la zona de color gris claro es la dispersión asociada, mientras que las curvas grises oscuro son los resultados de Pasten (2007), la curva continua es el promedio y las curvas segmentadas la dispersión.

En la Figura 6.1 se muestran los resultados obtenidos mostrándose los resultados actuales con negro y la dispersión correspondiente en gris, los resultados de Pasten (2007) se muestran en gris oscuro, siendo la línea continua la razón espectral promedio y las segmentadas representan la dispersión. Se puede apreciar que ambas curvas siguen formas similares por lo que sería posible aplicar la clasificación enunciada en este trabajo obteniéndose que, al menos en forma, las razones se mantienen espectrales similares.

Tabla 6.1 Distancia entre Registros

Estación	Comuna	Registro Pasten 2007	Distancia entre Registros [m]	Tipo H/V
DG01	Santiago	Stgo Centro 20	162,0	Peak Somero
DG06	Peñalolén	FSR	174,0	Plana
DG13	Vitacura	DSCH	385,4	Plana
DG16	Ñuñoa	Ñuñoa 5	434,2	Peak Marcado
DG21	Quilicura	PCQ	850,8	Peak Marcado
DG30	Maipú	Maipú 1	893,0	Peak Muy Marcado

6.3. Comparación de los Periodos Fundamentales con las Características Geotécnicas de la Cuenca/mapa Leyton et al, (2011)

En la Figura 6.2 se han puesto las estaciones coloreadas según la clasificación de espectral H/V resultante del Capítulo 5: azul para las planas, verdes para las que tienen un peak somero, amarillo para las que poseen un peak marcado y rojo para las que tienen un peak muy marcado. Se puede apreciar a grandes rasgos que las razones más planas están enmarcadas en la zona de los depósitos de la grava de Santiago, y las razones con peak importantes están en la zona de los finos del norte y la pumacita de Maipú, por lo que se podría afirmar que las razones espectrales siguen algún patrón para suelos de similares características.

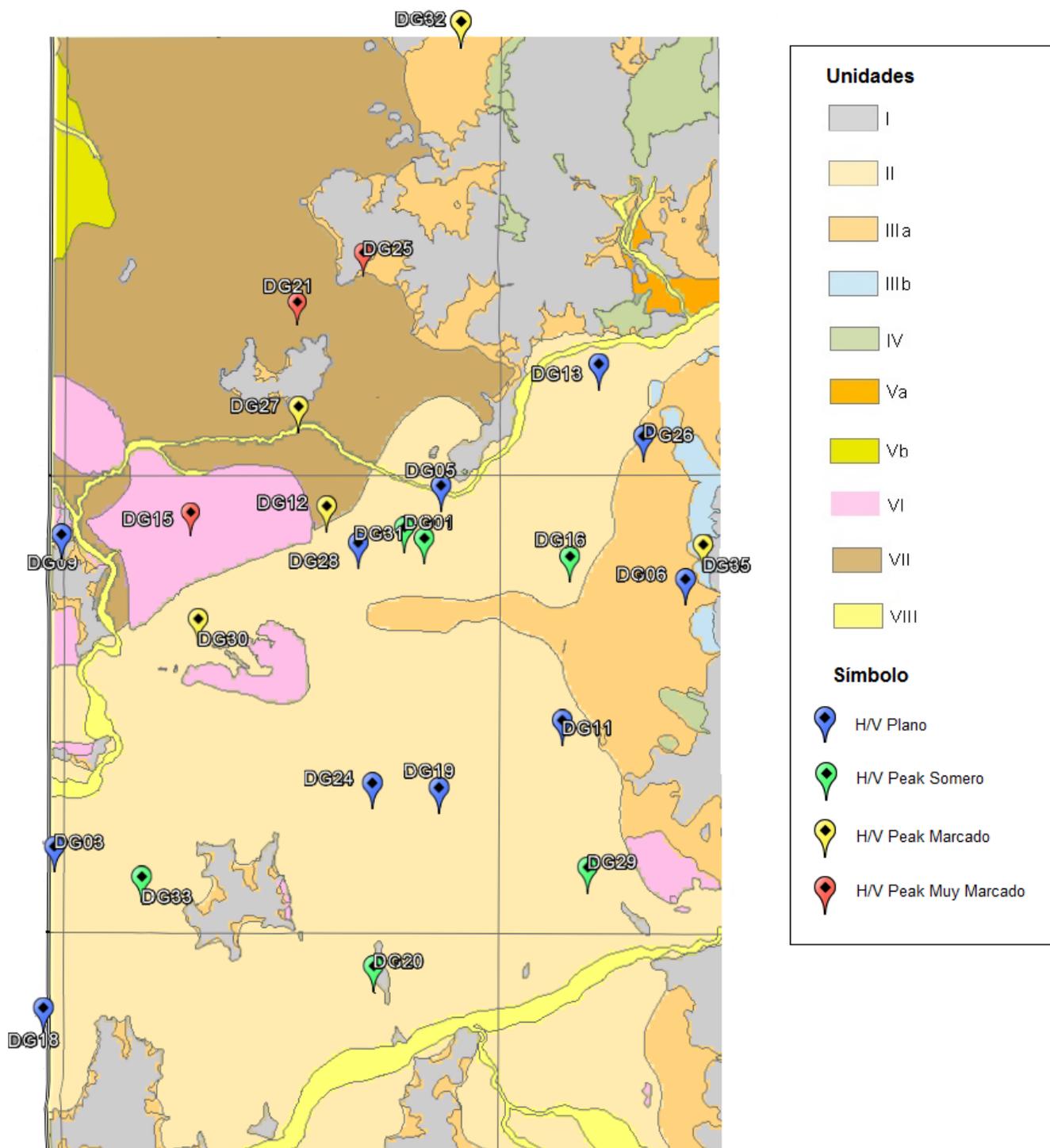


Figura 6.2 Mapa de Leyton et al, (2011) con los tipos de H/V obtenidos. Los marcadores indican la posición de las estaciones y el color indica el tipo de razón espectral. Las zonas coloreadas indican la unidad geológica descrita por Leyton et al en "Zonificación sísmica de la cuenca de Santiago, Chile", 2011.

6.4. Comentarios y Conclusiones

A partir de la posición de las estaciones en el mapa de Leyton et al, (2011), se puede apreciar una clara correlación entre los depósitos más rígidos con razones espectrales sin un peak marcado lo que muestra que entre esto suelos y el basamento hay un menor contraste. En otras palabras, al realizar la razón espectral H/V en la grava de Santiago o en la roca de la cuenca, se obtiene un espectro plano o con un peak somero.

Algo similar a lo enunciado al final del párrafo anterior ocurre al observar las razones con un peak marcado, 2 de ellas se ubican en la grava, sin embargo se ubican muy cerca de depósitos menos rígidos por lo que es de esperar que exista algún estrato con un espesor significativo que provee al sitio de un periodo natural de vibración representativo.

Las estaciones que muestran un peak muy marcado y que alcanzan a ubicarse dentro del mapa están claramente enmarcadas en depósitos de suelos más finos y por tanto de menor rigidez por lo que es de esperar que en estos sitios se tenga una mayor impedancia de las ondas sísmicas y que esta propagación incorpore el marcado periodo natural de vibración del sitio.

Con respecto a la campaña realizada por Pasten (2007), se puede llegar a una de las conclusiones del capítulo 5 a partir de la desviación que muestran las razones para las frecuencias cercanas a 0, siendo el caso crítico Vitacura (DG13). Estos registros corresponden a sismos, por lo que el tiempo de registro es de alrededor de 10 minutos, razón por la que se utilizó una ventana de 30 [s] por lo que probablemente los periodos más largos no alcanzan a predominar produciendo que exista una mayor dispersión para ellos.

Las razones espectrales en las estaciones DG01, DG06, DG13, DG16 y DG30 son similares a diferencia de la estación DG21, cuya frecuencia fundamental y forma de la razón espectral cambia, lo que puede dar alguna noción de que tal vez este tipo de depósito sufre alguna degradación luego de algún sismo de gran magnitud o que dada la distancia, los registros son tan cercanos.

7. Variaciones Temporales de H/V

7.1. Introducción

El principio que sigue la técnica de Nakamura tiene directa relación con el tipo de señales que son analizadas, por lo que una pregunta válida e inmediata es cuestionarse cuánto, cómo y por qué puede cambiar la razón espectral entre distintos registros temporales de un mismo sitio.

En este capítulo se busca entregar el análisis respecto de las variaciones que pueda sufrir la razón espectral a lo largo un tiempo determinado, como lo es un día completo o una semana completa. En otras palabras se persigue comparar el comportamiento de los H/V en distintas horas del día y en distintos días de la semana para así poder observar que tan estable o inestable resultan las razones, tanto en magnitud como en forma.

Con la información entregada será posible identificar cuánto podrían variar la estimación de los parámetros dinámicos que se pretenden cuantificar, que corresponden a la amplificación dinámica y al periodo natural de vibración si es que es posible su identificación. Con ello se podrá tener una estimación que tan fiel permanece esta metodología a la características del depósito.

Para establecer este estudio se procedió a calcular las razones, para las ventanas temporales establecidas al igual que en el capítulo 5, sin embargo, dada la cantidad de curvas, estas son presentadas mediante espectrogramas en donde se pueden visualizar las 3 dimensiones estudiadas la magnitud del H/V, la frecuencia y el tiempo. Se escogió esta herramienta por la gran facilidad con que se pueden observar diferencias para los parámetros involucrados.

Para realizar el análisis se escogieron estaciones representativas a cada tipo de razón espectral:

- DG06 - Penalolen (Plana)
- DG24 - El Bosque (Plana)
- DG31 - Santiago Centro (Peak Somero)
- DG30 - Maipú (Peak Marcado)
- DG21 - Quilicura (Peak Muy Marcado)

7.2. Variación Diaria de H/V

Para analizar la variación diaria se eligieron los registros del día Juliano 9 del año 2014 para las estaciones mencionadas, por lo que el intervalo registrado corresponde a las 24 [hrs] desde las 8 pm del 8 de Enero del 2014 hasta las 8 pm del 9 de Enero del 2014. Sin embargo, la DG31 presentó problemas (ver Anexo B), por lo que el intervalo temporal para esta estación es desde las 8 pm del 9 de Enero del 2014 hasta las 8 pm del 10 de Enero del 2014. Los registros se cortaron en tramos de 1 hora y para cada hora se calculó la razón espectral correspondiente y con los resultados se elaboró el espectrograma asociado como se enunció en la introducción.

En el Capítulo 5, los espectros mostraban una dispersión en color gris, dicha dispersión se corresponde a un valor desviación estándar (σ) asociada a cada frecuencia del espectro, producto de la cantidad de ventanas seleccionadas. Si se realiza el análisis para cada hora, entonces se tiene una relación entre desviación estándar (σ), la frecuencia y el tiempo, por lo cual también es posible crear un espectrograma asociado a estos resultados.

Además dados los datos de razones espectrales (H/V) y desviaciones estándar (σ) se calcula la razón espectral promedio y la desviación estándar promedio del intervalo escogido de 24 [hrs], para así tener una representación de la forma que sigue la curva de la razón espectral.

Con los datos obtenidos se pudieron realizar los análisis expuestos cuyos resultados se muestran en las Figuras 7.1 a la 7.5, cada una dividida en 4 partes, explicadas a continuación:

En las Figuras 7.1(a1), 7.2(a1), 7.3(a1), 7.4(a1) y 7.5(a1) están los espectrogramas de la desviación estándar (σ) de las razones espectrales calculadas, los colores representan la magnitud de dicho parámetro, con una escala relativa a cada estación analizada que va desde azul oscuro a rojo oscuro representando valores mínimos y máximos de σ respectivamente; en otras palabras una baja dispersión mostrará tonalidades azules, mientras que una alta tonalidades rojas. En la vertical se muestra el rango de frecuencias trabajado y en la horizontal las horas del día.

En las Figuras 7.1(a2), 7.2(a2), 7.3(a2), 7.4(a2) y 7.5(a2) están los espectrogramas de razones espectrales (H/V) calculadas para cada hora, los colores representan la magnitud del valor en la curva del H/V, con una escala relativa a cada estación analizada que va del azul

oscuro a rojo oscuro representando los valores mínimos y máximos de H/V respectivamente. En la vertical se muestra el rango de frecuencias trabajado y en la horizontal las horas del día.

Un espectrograma de H/V asociado a razón espectral plana, no debiera mostrar grandes cambios de colores, siendo el color predominante el color asociado a 1 en la barra de colores; un espectrograma de una razón espectral peak somero debiera presentar más zonas rojas, mientras que en un espectrograma con algún peak marcado se deben observar zonas rojas oscuras oscuras más anchas a diferencia de un espectrograma con un peak marcado en donde debe existir un contraste fuerte de colores por lo tanto se debe distinguir claramente una zona roja muy oscura y una zona azul muy oscura. La magnitud del valor en la curva H/V alcanzadas por los distintos peak corresponde al valor del color rojo mostrado en la figura, el que no necesariamente es el mayor valor de la escala de colores.

Así mismo la frecuencia fundamental será la que esté relacionada con el color más alejado del azul oscuro, por lo que resulta evidente que si el espectrograma no sale de dicho color, es decir corresponde a una razón espectral plana, no se podrá distinguir una frecuencia asociada.

En las Figuras 7.1(b), 7.2(b), 7.3(b), 7.4(b) y 7.5(b) se observa la curva de la razón espectral promedio del día y la desviación estándar correspondiente, en donde la vertical es el rango de frecuencias utilizado y la horizontal el valor H/V. En concordancia con el espectrograma de la razón espectral, si en (a2) no hay un contraste fuerte de colores, en (b) debiera aparecer un H/V plano, mientras que si el contraste es fuerte, es de esperar en (b) un H/V con un peak notorio.

Por último en 7.1(c), 7.2(c), 7.3(c), 7.4(c) y 7.5(c) están los registros de velocidades que corresponde al intervalo temporal escogido de 24 [hrs] con todas sus componentes espaciales la vertical (Z), la Norte-Sur (N-S) y Este-Oeste (E-O), el eje vertical corresponde a la velocidad registrada y la horizontal al tiempo registrado.

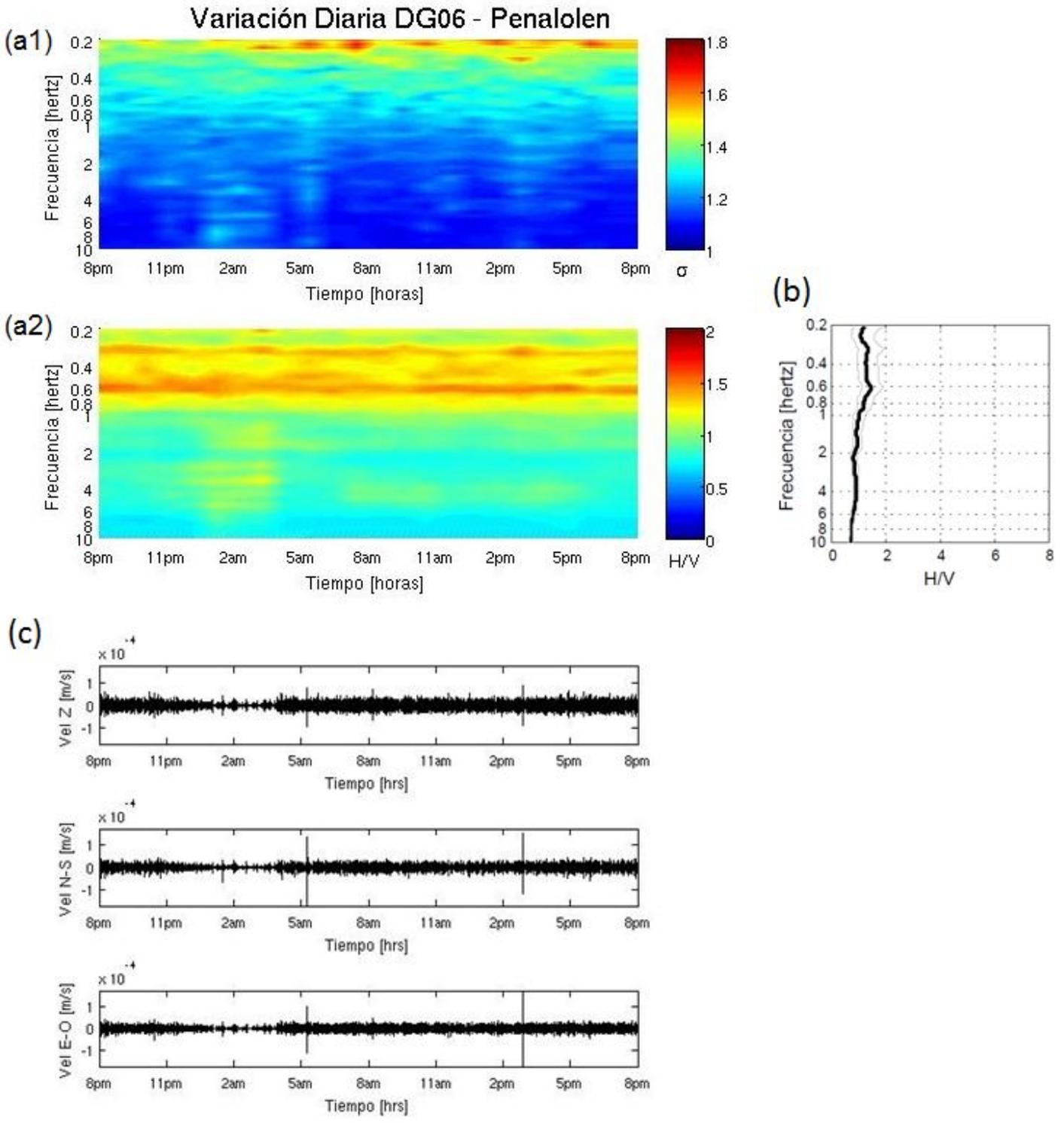


Figura 7.1 Variación Diaria DG06 - Penalolen (Plana).

(a1) es el espectrograma de la desviación estándar de las razones espectrales (σ), **(a2)** es el espectrograma de la amplitud de la razón espectral (H/V), **(b)** corresponde a la curva H/V del día completo y **(c)** muestra a las componentes del registro.

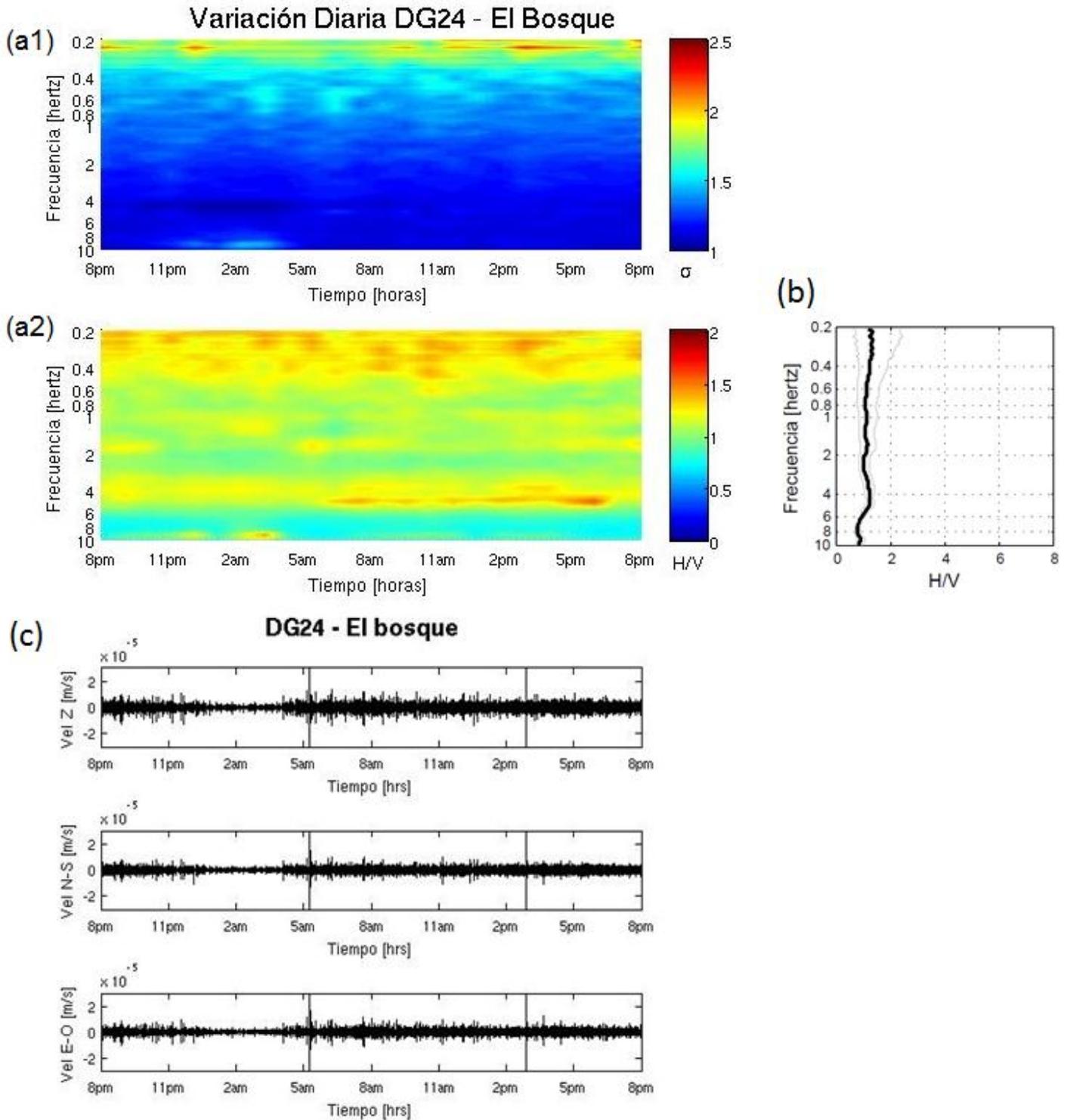


Figura 7.2 Variación Diaria DG24 - El Bosque (Plana).

(a1) es el espectrograma de la desviación estándar de las razones espectrales (σ), **(a2)** es el espectrograma de la amplitud de la razón espectral (H/V), **(b)** corresponde a la curva H/V del día completo y **(c)** muestra a las componentes del registro.

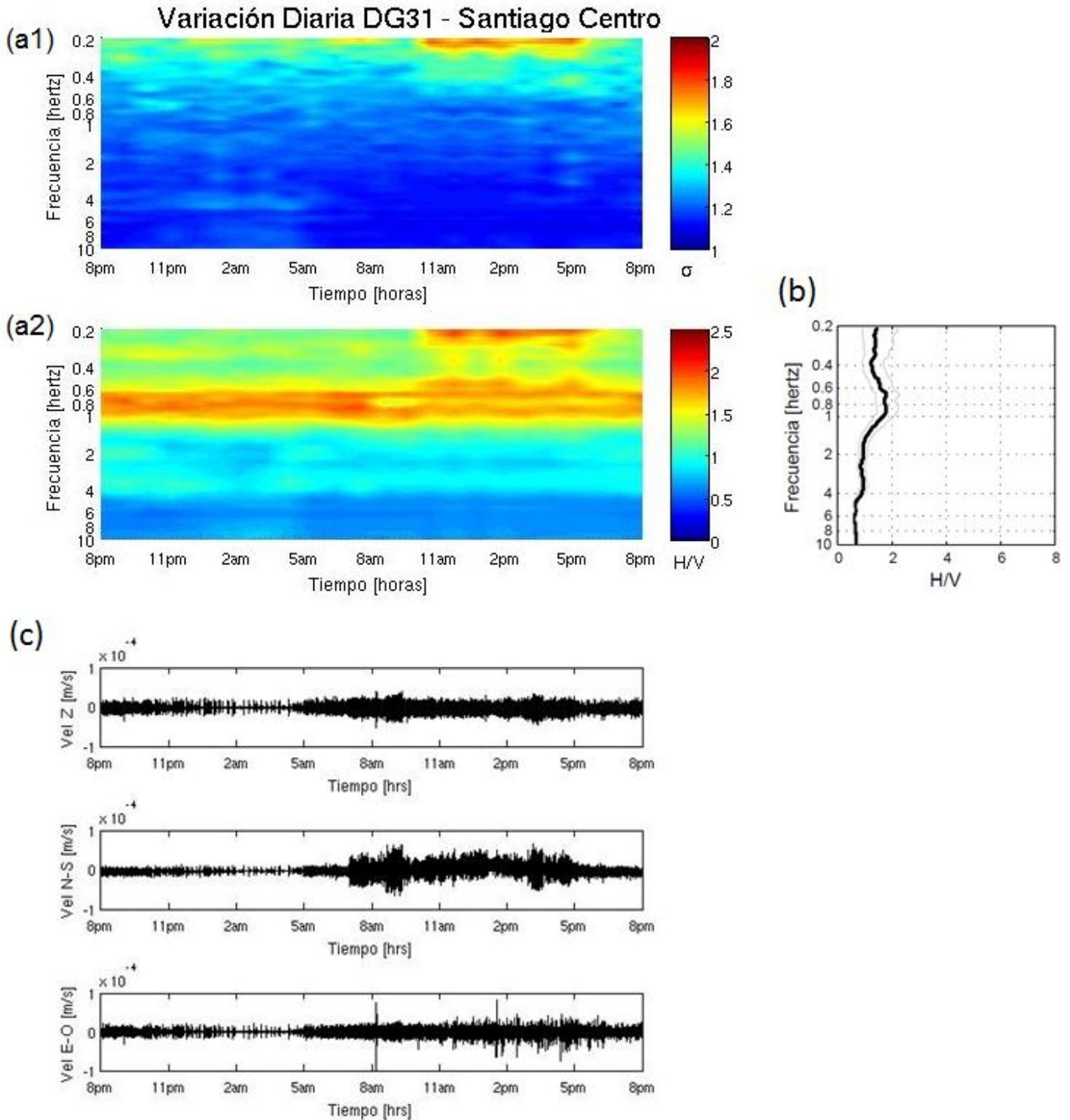


Figura 7.3 Variación Diaria DG31 - Santiago Centro (Peak Somero).

(a1) es el espectrograma de la desviación estándar de las razones espectrales (σ), **(a2)** es el espectrograma de la amplitud de la razón espectral (H/V), **(b)** corresponde a la curva H/V del día completo y **(c)** muestra a las componentes del registro.

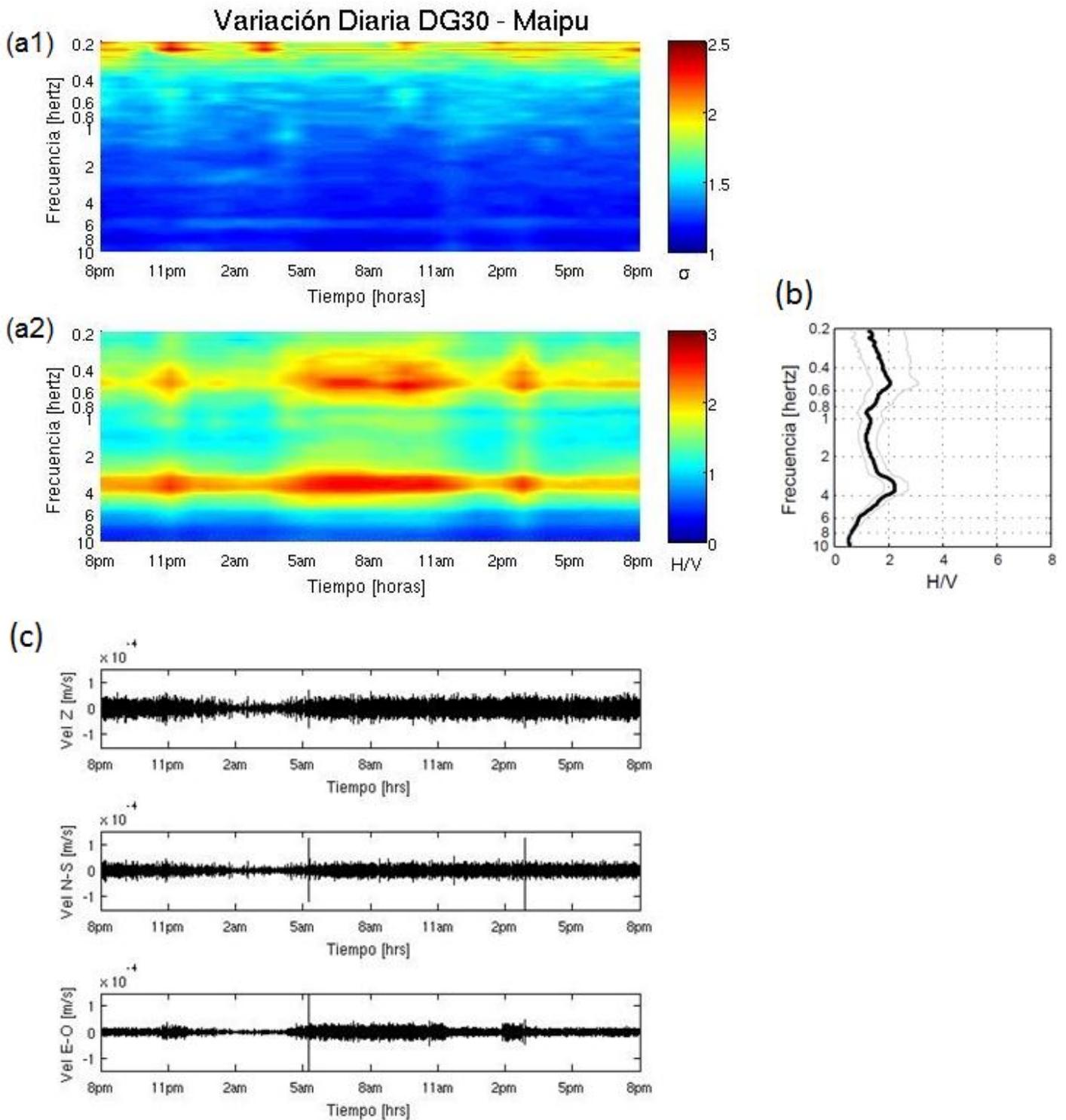


Figura 7.4 Variación Diaria DG30 - Maipu (Peak Marcado).

(a1) es el espectrograma de la desviación estándar de las razones espectrales (σ), (a2) es el espectrograma de la amplitud de la razón espectral (H/V), (b) corresponde a la curva H/V del día completo y (c) muestra a las componentes del registro.

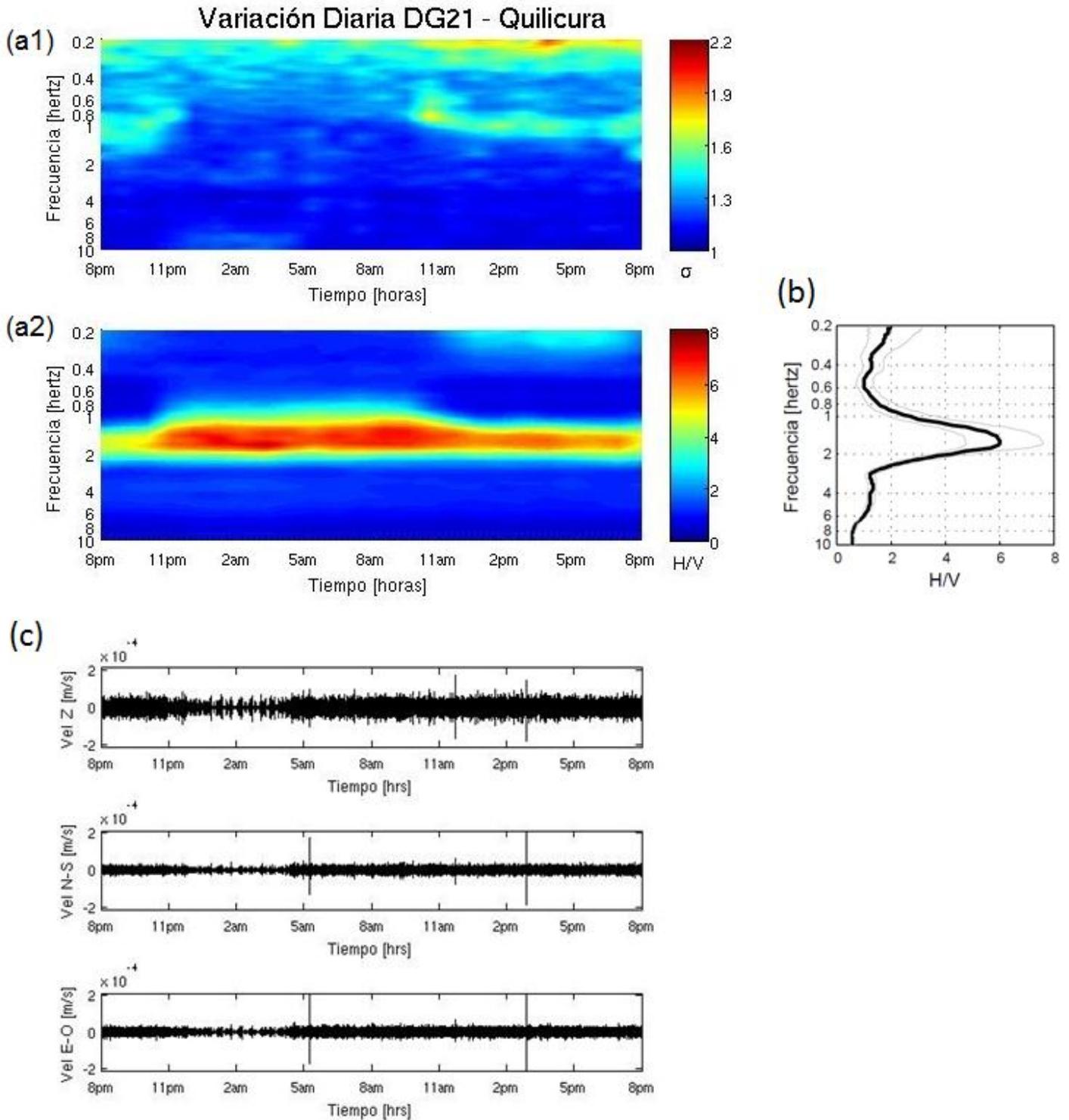


Figura 7.5 Variación Diaria DG21 - Quilicura (Peak Muy Marcado).

(a1) es el espectrograma de la desviación estándar de las razones espectrales (σ), (a2) es el espectrograma de la amplitud de la razón espectral (H/V), (b) corresponde a la curva H/V del día completo y (c) muestra a las componentes del registro.

7.3. Variación Mensual de H/V

Para analizar la variación mensual de las razones espectrales H/V, el mes escogido corresponde a Enero del año 2014, el que se utilizó por ser uno de los meses que fue registrado casi en su totalidad por todas las estaciones usadas en este capítulo. Para cada día desde el 1 al 29 de Enero 2014 se calcularon las razones espectrales de las señales sismológicas que en tiempo local corresponden a los registros entre las 1 am y las 4 am. Dicha ventana temporal se eligió a partir de los resultados mostrados en el capítulo 7 en donde se puede observar claramente que dicho rango es el que muestra una menor desviación estándar (σ) en todas las estaciones (ver parte a1 de las Figuras 7.1 a la 7.5). Además al observar las señales (ver parte c de las Figuras 7.1 a la 7.5), se tiene que entre dichas horas los registros permanecen bastante estables en cuanto a amplitud, lo que se condice con el hecho de que esta ventana temporal corresponde a las horas de la madrugada, en donde se espera un menor ruido ambiente, ya que hay una significativa disminución del tránsito y las actividades humanas e industriales.

Con respecto a los resultados se muestran de la misma forma que en el punto 7.2. En este caso no se cuenta con un registro que incorpore continuamente las señales utilizadas para cada día analizado (3 horas por día), ya que dicha cantidad de datos no se podrían graficar con una escala visualmente optima, por lo que no tiene sentido presentarla.

Los datos obtenidos están en las Figuras de la 7.6 a la 7.10, cada una dividida en 3 partes: En las Figuras 7.6(a1), 7.7(a1), 7.8(a1), 7.9(a1) y 7.10(a1) están los espectrogramas de la desviación estándar (σ) de las razones espectrales calculadas, los colores representan la magnitud de dicho parámetro, con una escala relativa a cada estación analizada que va azul oscuro a rojo oscuro representando valores mínimos y máximos de σ respectivamente; en otras palabras una baja dispersión mostrará tonalidades azules, mientras que una alta tonalidades rojas. En la vertical se muestra el rango de frecuencias trabajado y en la horizontal las horas del día.

En las Figuras 7.6(a2), 7.7(a2), 7.8(a2), 7.9(a2) y 7.10(a2) están los espectrogramas de razones espectrales (H/V) calculadas para cada hora, los colores representan la magnitud del valor en la curva del H/V, con una escala relativa a cada estación analizada que va del azul oscuro a rojo oscuro representando los valores mínimos y máximos de H/V respectivamente. En la vertical se muestra el rango de frecuencias trabajado y en la horizontal las horas del día.

Un espectrograma de H/V asociado a razón espectral plana, no debiera mostrar grandes cambios de colores, siendo el color predominante el color asociado a 1 en la barra de colores; un espectrograma de una razón espectral peak somero debiera presentar más zonas rojas, mientras que en un espectrograma con algún peak marcado se deben observar zonas rojas oscuras más anchas a diferencia de un espectrograma con un peak marcado en donde debe existir un contraste fuerte de colores por lo tanto se debe distinguir claramente una zona roja muy oscura y una zona azul muy oscura. La magnitud del valor en la curva H/V alcanzadas por los distintos peak corresponde al valor del color rojo mostrado en la figura, el que no necesariamente es el mayor valor de la escala de colores.

Así mismo, la frecuencia fundamental será la que esté relacionada con el color más alejado del azul oscuro, por lo que resulta evidente que si el espectrograma no sale de dicho color, es decir corresponde a una razón espectral plana, no se podrá distinguir una frecuencia asociada.

En las Figuras 7.6(b), 7.7(b), 7.8(b), 7.9(b) y 7.10(b) se observan las curvas de la razón espectral promedio del día y la desviación estándar correspondiente, en donde la vertical es el rango de frecuencias utilizado y la horizontal el valor H/V. En concordancia con el espectrograma de la razón espectral, si en (a2) no hay un contraste fuerte de colores, en (b) debiera aparecer un H/V plano, mientras que si el contraste es fuerte, es de esperar en (b) un H/V con un peak notorio.

Por último, se buscó un mes distante a Enero para poder realizar este análisis, se optó por utilizar los registros de la DG21 para el mes de Octubre 2013 dado que esta estación registra el mayor peak, parámetro que tiende a ser menos constante según lo que sea visto en este trabajo. En este caso se calcularon las razones espectrales de las señales sismológicas de entre las 1 am y las 4 am para cada día desde el 7 al 26 de Octubre 2013. Los resultados se muestran en la Figura 7.11 dividida en las mismas 3 partes ya explicadas.

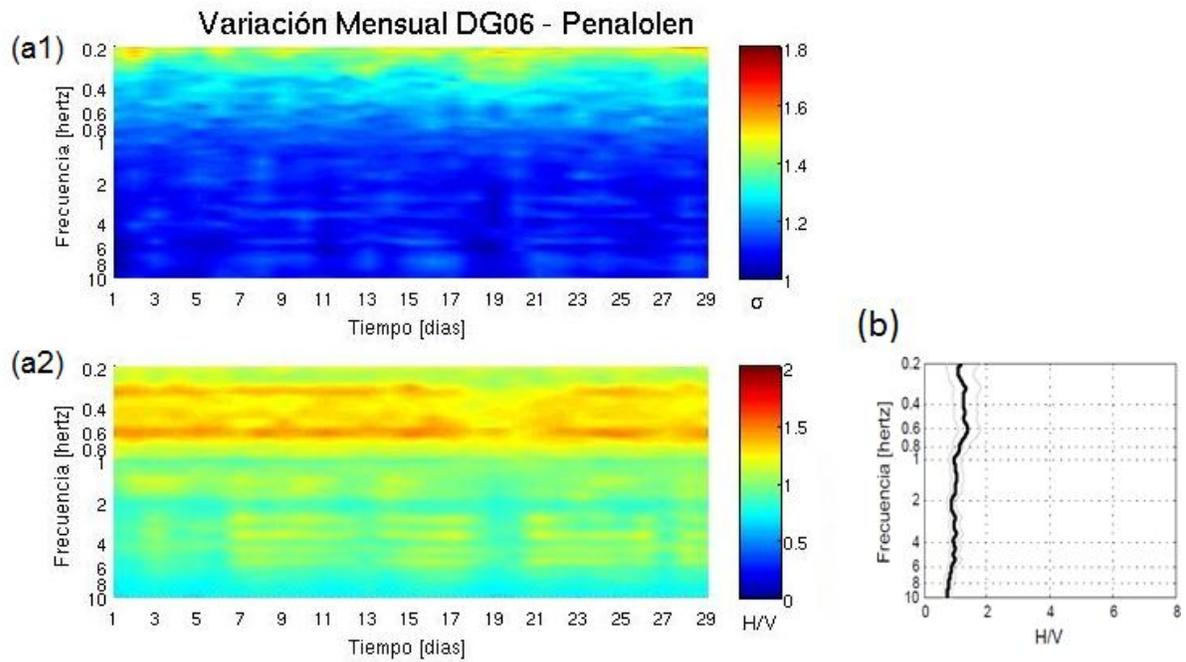


Figura 7.6 Variación Enero 2014 DG06 - Penalolen (Plana).

(a1) es el espectrograma de la desviación estándar de las razones espectrales (σ), (a2) es el espectrograma de la amplitud de la razón espectral (H/V) y (b) corresponde a la curva H/V del día completo

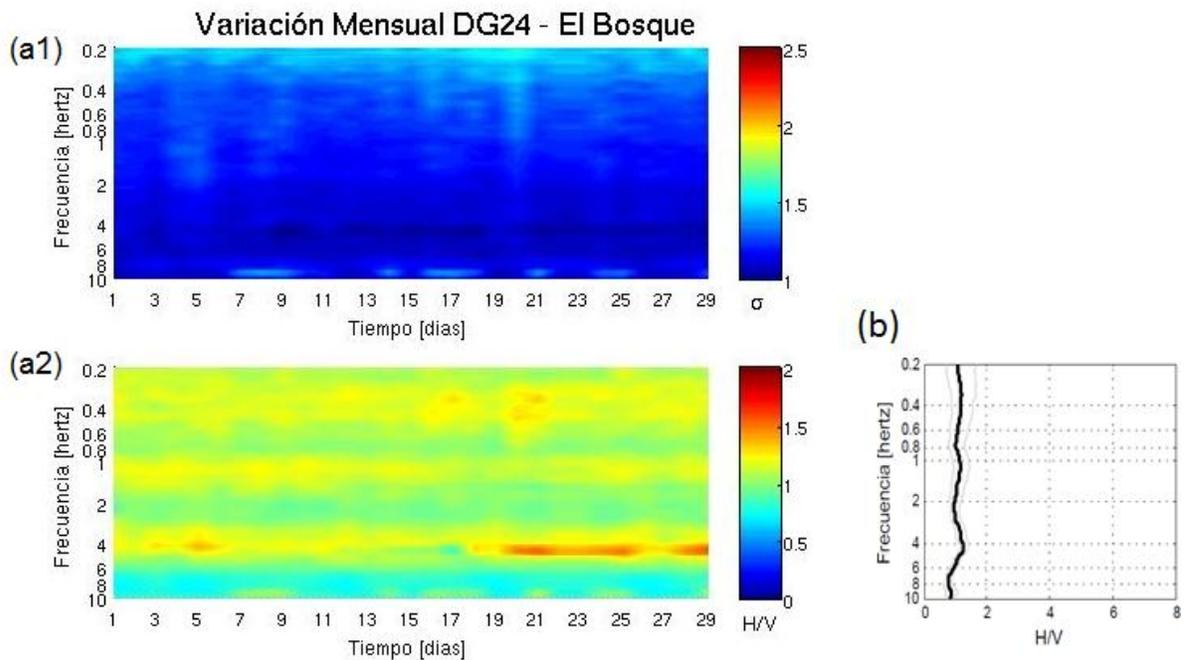


Figura 7.7 Variación Enero 2014 DG24 - El Bosque (Plana).

(a1) es el espectrograma de la desviación estándar de las razones espectrales (σ), (a2) es el espectrograma de la amplitud de la razón espectral (H/V) y (b) corresponde a la curva H/V del día completo

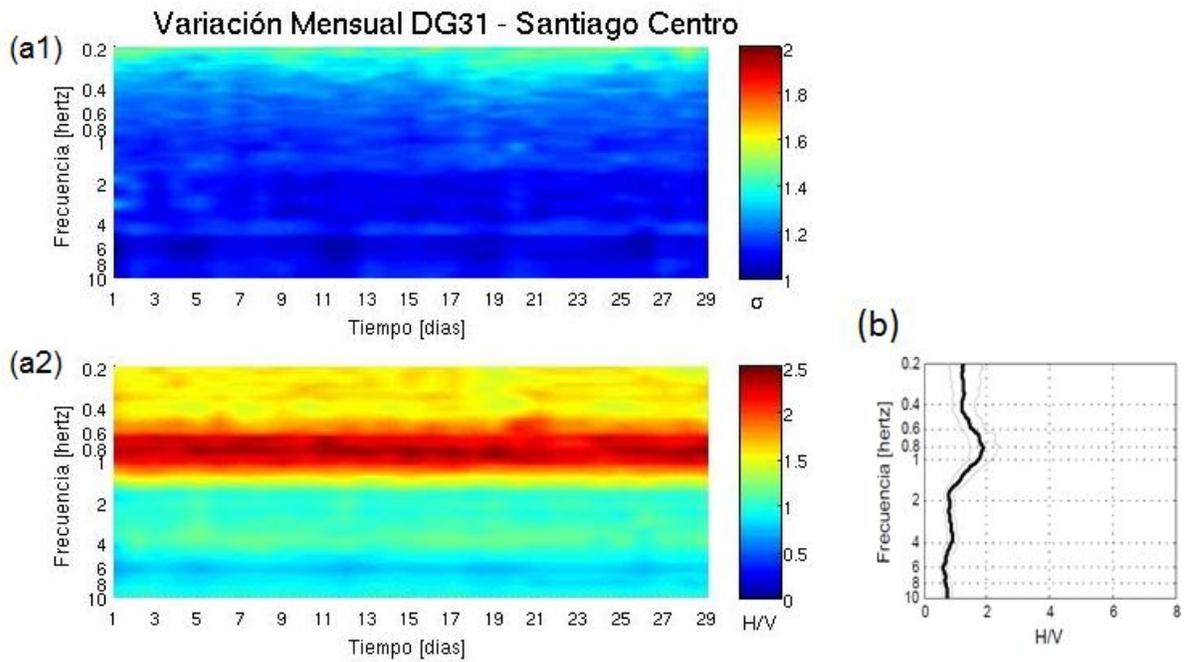


Figura 7.8 Variación Enero 2014 DG31 - Santiago Centro (Peak Somero)).

(a1) es el espectrograma de la desviación estándar de las razones espectrales (σ), (a2) es el espectrograma de la amplitud de la razón espectral (H/V) y (b) corresponde a la curva H/V del día completo

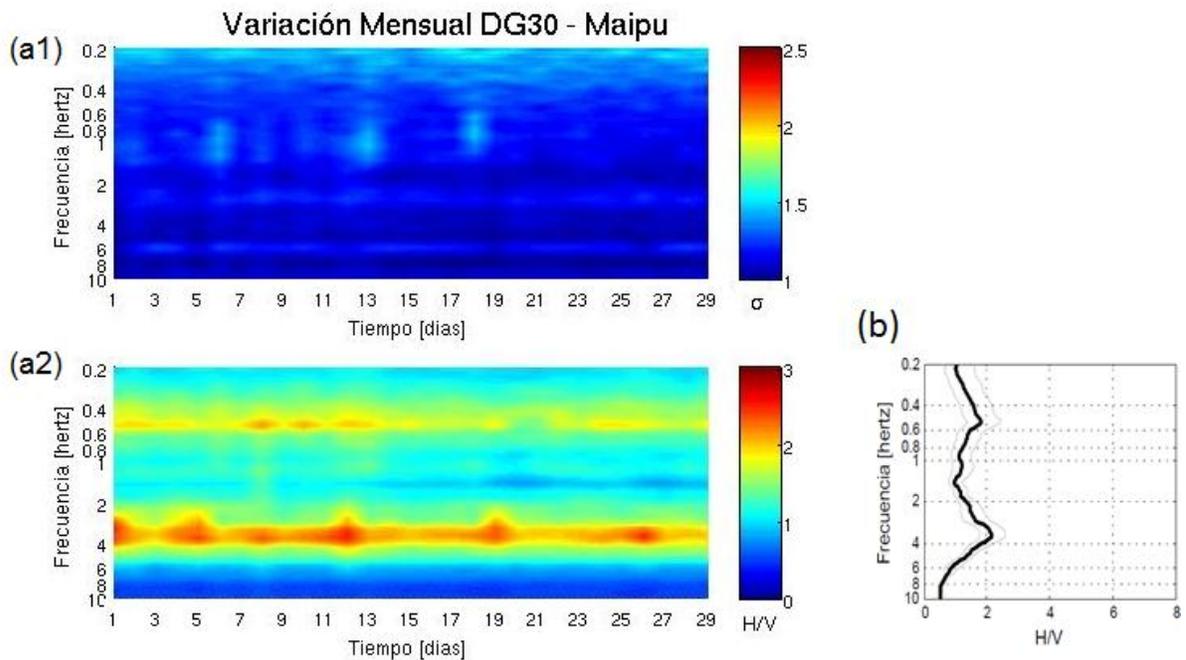


Figura 7.9 Variación Enero 2014 DG30 - Maipu (Peak Marcado).

(a1) es el espectrograma de la desviación estándar de las razones espectrales (σ), (a2) es el espectrograma de la amplitud de la razón espectral (H/V) y (b) corresponde a la curva H/V del día completo

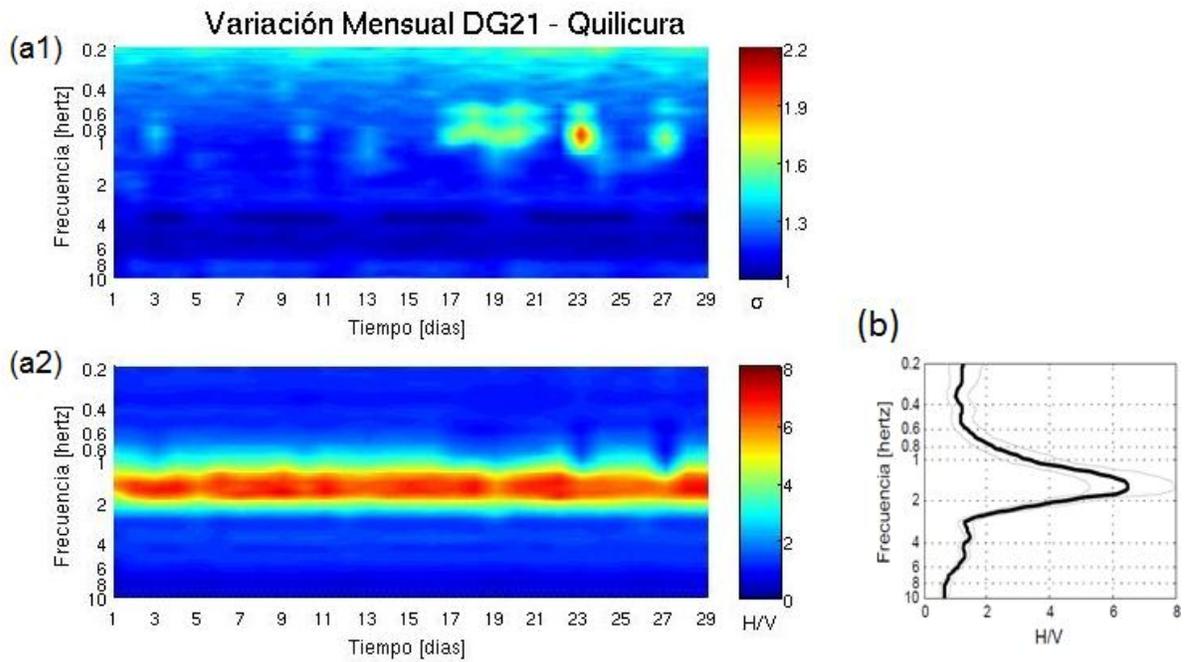


Figura 7.10 Variación Enero 2014 DG21 - Quilicura (Peak Muy Marcado).

(a1) es el espectrograma de la desviación estándar de las razones espectrales (σ), (a2) es el espectrograma de la amplitud de la razón espectral (H/V) y (b) corresponde a la curva H/V del día completo

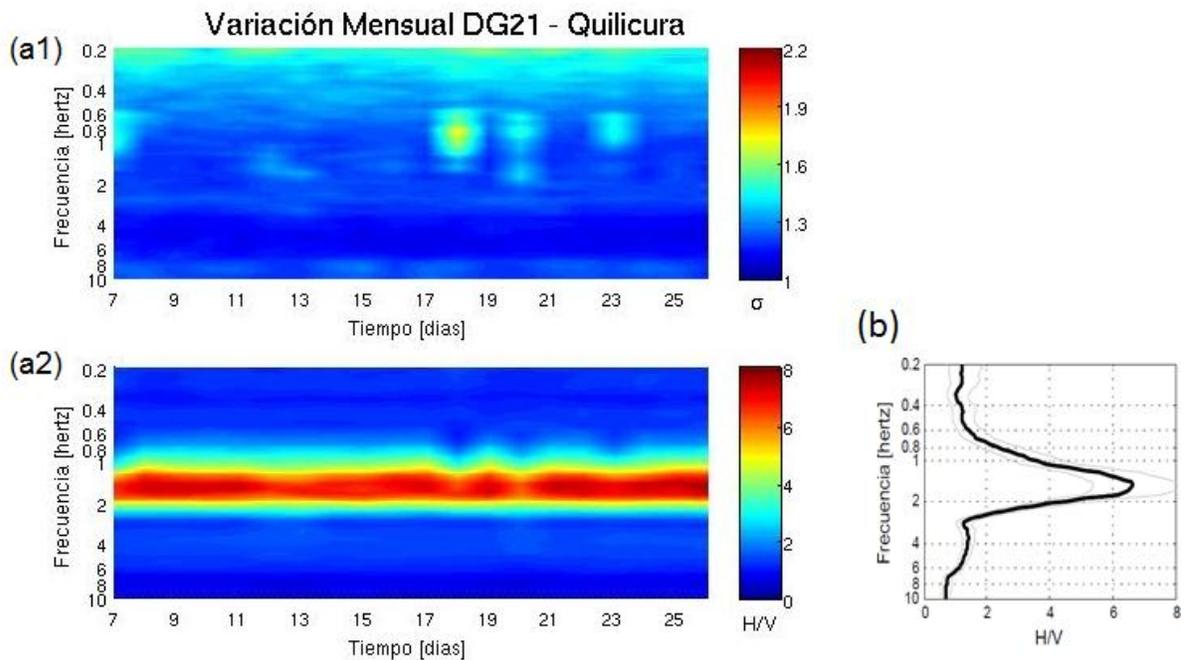


Figura 7.11 Variación Octubre 2013 DG21 - Quilicura (Peak Muy Marcado).

(a1) es el espectrograma de la desviación estándar de las razones espectrales (σ), (a2) es el espectrograma de la amplitud de la razón espectral (H/V) y (b) corresponde a la curva H/V del día completo

7.4. Comentarios y Conclusiones

En general se observa de los espectrogramas de la razón espectral H/V que los valores obtenidos permanecen constantes a lo largo del tiempo, al menos en forma, ya que no se observan cambios abruptos de colores en la horizontal. Al comparar las variaciones diarias con las mensuales es fácil apreciar que estas últimas permanecen mucho más estables tanto en el eje del tiempo como en el de las frecuencias, incluso no se observan grandes cambios en el rango de colores para las variaciones de las estaciones analizadas.

Al observar los espectrogramas de la desviación estándar (σ) resulta evidente una notable mejora al pasar de las variaciones diarias a mensuales, ya que en estas últimas no se supera el color verde (salvo en un parte muy reducida de la Figura 7.10). Una similitud entre las variaciones diarias y mensuales resulta en que la mayor desviación se observa para bajas frecuencias, lo que mantiene relación con el efecto de periodos largos expuesto en el Capítulo 5.

Lo anterior viene a corroborar que el rango horario ideal para determinar la razón espectral es desde la 1am hasta las 4 am, esta decisión resulta adecuada para obtener razones espectrales con un menor error asociado, lo que se condice con ser las horas del día donde se tiene menos variación ambiental al ser las horas con menor tránsito y ruido urbano.

A partir de las ventanas temporales elegidas se concluye que las variaciones mensuales son estables. Incluso si se compara Enero con Octubre de la DG21, no se vislumbran grandes cambios en los espectrogramas de H/V, lo que es esperable ya que las condiciones climáticas solo afectan la capa superior del estrato.

En la variación diaria de la DG21 es donde se puede apreciar un cambio de forma más significativo en las horas de la tarde (tiempo local), apareciendo un peak somero para periodos largos, esto podría deberse a perturbaciones externas dado que esta estación está en pleno sector industrial. Algo similar ocurre para la DG31 por lo que este segundo peak es atribuible al ruido ambiente del sitio en dichas horas, en esta estación la situación es más crítica, ya que el peak que aparece es mayor al esperable, y al estar en las frecuencias más pequeñas se puede obtener un periodo fuera del rango esperado para gravas, sin embargo al observar la señal se aprecia claramente que entre las 11 am y 5 pm se tiene un registro con un ruido mayor y más variable al esperado, con lo que se distorsionan los análisis y los resultados esperados (ver Figura 7.3).

A pesar de lo expuesto en el párrafo anterior, si se omiten los cambios mencionados, el parámetro dinámico que permanece más estable es la estimación de la frecuencia natural de vibración del sitio, ya que cuando se puede alcanzar el color rojo en los espectrogramas de H/V se está observando un peak, este color se sostiene en el tiempo para una frecuencia determinada. Este efecto es mucho más notorio en las variaciones mensuales, en donde casi no hay cambios de colores a lo largo de la horizontal.

El máximo valor del H/V referenciado a la amplificación dinámica puede ser el elemento que mayor variación sufre al analizar las variaciones diarias cuando se muestra un peak importante como lo son las razones de la DG21 y la DG30. En ambas estaciones se alcanzan distintas tonalidades para los máximos asociados al día, existiendo variaciones de amplitud aproximadas de 5.5 a 8 y de 2 a 3 respectivas a cada estación, a pesar de que estos peak persisten en el eje de las frecuencias no se puede determinar con certeza cuál es el máximo propio del sitio. En la mayoría de las estaciones el valor máximo se estabiliza cuando se analizan las variaciones del mes, la DG21 es bastante estable en el espectrograma de H/V sin embargo la DG30, posee incrementos en el valor máximo alcanzado, al observar los días donde ocurre este aumento, que se muestra con un color celeste muy claro en el espectrograma, se tiene que son los días correspondientes a los domingos del mes de Enero, por lo que es posible que en la madrugada de dichos días ocurra alguna situación que genere mayor ruido.

Por último se puede percibir que la razón espectral con mayor dispersión es la observada en la estación DG21, que es la que representa la razón con un peak muy marcado, en otras palabras posee un máximo de gran magnitud, esto reitera el hecho de que los mayores cambios se vislumbran para la magnitud de los máximos alcanzados en los peak y no para el valor de la frecuencia natural que permanece bastante constante en el tiempo.

Por otro lado, las estaciones sin un peak significativo no sufren mayores alteraciones a lo largo del tiempo, por lo que se puede decir que este tipo de razones es más constante que las razones que muestran peak marcados.

8. Recomendación de uso de H/V

8.1. Introducción

Como se vió en el Capítulo 7 el resultado de las razones espectrales depende de las señales analizadas, por lo que otra pregunta válida resulta al cuestionarse cuál es el tiempo mínimo que se requiere registrar para obtener una razón espectral representativa del sitio.

En este capítulo se muestran las variaciones que pueda sufrir la razón espectral producto del tiempo de registro utilizado. Se pretende comparar el comportamiento de los H/V en distintas ventanas temporales desde 30 [min] hasta 4 [hrs], para así poder observar que tan representativas resultan las razones, es decir que tanto se modifican en magnitud como en forma. Cabe destacar que los registros fueron tomados entre las 8 pm y las 12 am del 8 de Enero para todas las estaciones mencionadas más abajo.

Con la información entregada el parámetro que más se pretenden discutir corresponde al valor máximo de la curva que está directamente ligada al periodo natural de vibración si es que es posible determinar un peak. Se busca por lo tanto, encontrar el mínimo de tiempo de registro que proporciona un peak dentro de una vecindad del periodo natural y así poder asegurar que se determina de forma fidedigna dicho parámetro dinámico.

Para establecer este estudio se procedió a calcular las razones espectrales, para distintas ventanas temporales, de igual forma que en el Capítulo 5.

Para realizar dicho análisis se escogieron 4 estaciones una por cada tipo de razón espectral:

- DG24 - El Bosque (Plana)
- DG31 - Santiago Centro (Peak Somero)
- DG30 - Maipú (Peak Marcado)
- DG21 - Quilicura (Peak Muy Marcado)

8.2. H/V Para Distintos Tiempos de Registro

Para analizar la variación de distintos tiempos de registros para calcular el H/V se eligió en tiempo universal las primeras 4 [hrs] del día Julianos 9 año 2014, las primeras 2 [hrs], la primera 1[hra] y los primeros 30 [min] calculándose las razones espectrales para cada uno de estos registros.

En las Figuras de 8.1 a la 8.4 se puede apreciar como varían las razones para las ventanas temporal mencionadas, cabe destacar que en estas figuras sólo se trabajó con la curva promedio por lo que no se muestra la dispersión de las razones, los colores representan la cantidad de tiempo utilizada para realizar las razones, siendo el rojo la mayor cantidad de tiempo y el azul la menor. En el eje vertical está el valor de la curva del H/V y en la horizontal el rango de frecuencias trabajado.

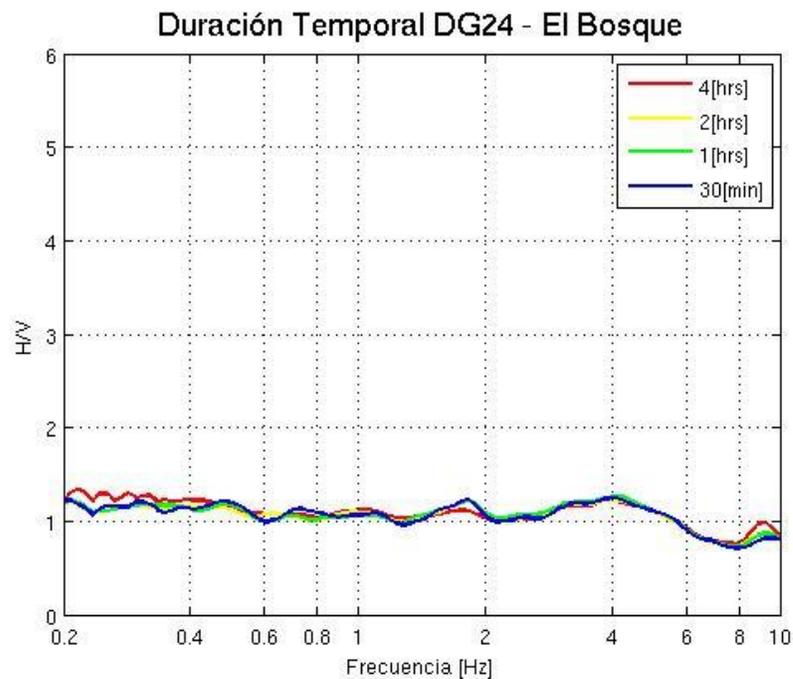


Figura 8.1 Razones Espectrales con distintos tiempo de registros para un HV Plano

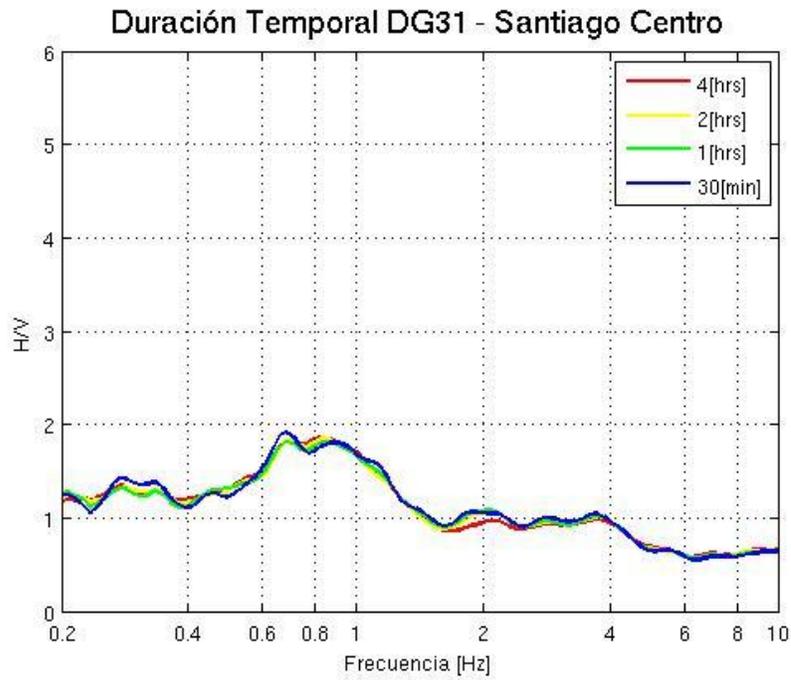


Figura 8.2 Razones Espectrales con distintos tiempo de registros para un HV con Peak Somero

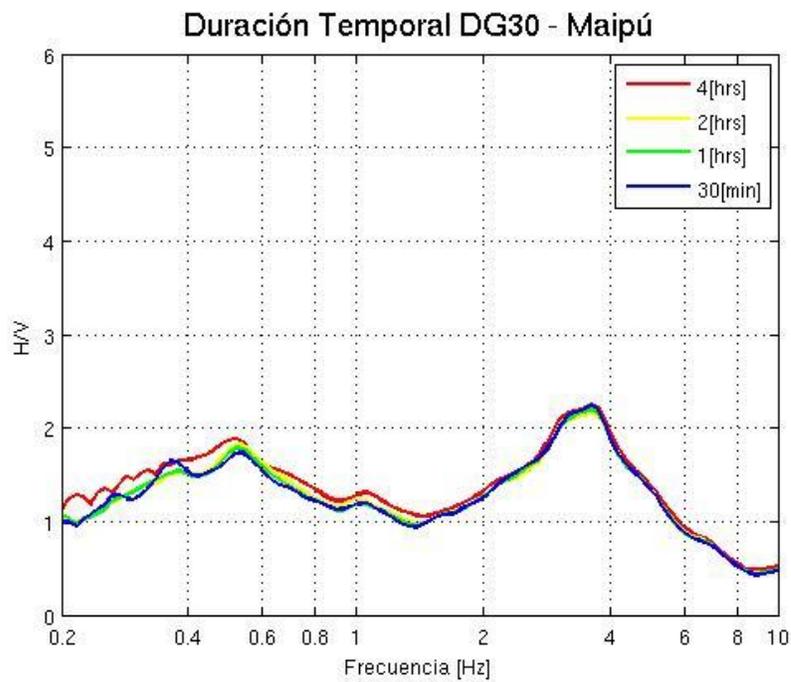


Figura 8.3 Razones Espectrales con distintos tiempo de registros para un HV con Peak Marcado

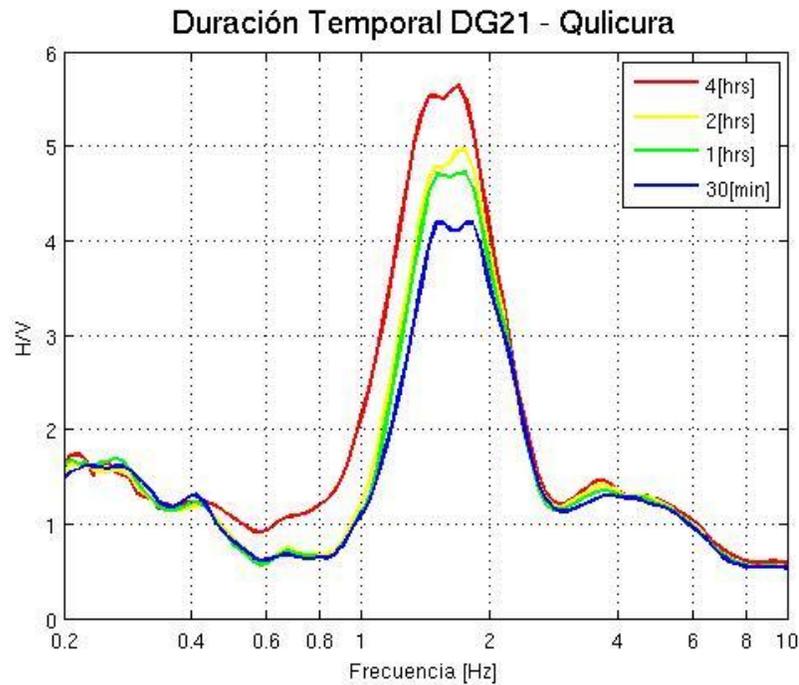


Figura 8.4 Razones Espectrales con distintos tiempo de registros para un HV con Peak Muy Marcado

8.3. Comentarios y Conclusiones

Se puede hacer un análisis bastante similar a las últimas ideas enunciadas en el capítulo anterior, en donde pareciera ser que las razones espectrales con un peak de gran magnitud son más susceptibles a sufrir cambios en las magnitudes de sus máximos que las que no presentan un peak significativo, ya que nuevamente es la DG21 la estación que muestra mayores diferencias en las razones obtenidas a partir de distintos tiempos de registros.

A pesar de lo anterior, inclusive para la DG21, se mantiene bastante constante la frecuencia asociada al máximo por lo que se reafirma el hecho de que este parámetro no varía a pesar del tiempo que se considere en su análisis, por lo que se podría afirmar que la estimación periodo natural de vibración no sufre grandes cambios al variar el tiempo de registro.

9. Comentarios y Conclusiones Finales

El arreglo denso de estaciones sismológicas ha permitido poder realizar un análisis de las razones espectrales en gran parte de los depósitos de cuenca de Santiago y con ello correlacionar características geotécnicas del tipo de suelo con el efecto de sitio esperado. Además de poder estudiar en detalle como varían las razones espectrales (H/V) o técnica de Nakamura y así verificar la estabilidad de esta técnica a lo largo del tiempo.

Una razón espectral H/V cuyo peak represente un valor alto (mayor a 3) como es el caso de la estación DG21 - Quilicura implicaría un gran contraste de impedancias entre la roca y el depósito de suelo, mientras que un H/V plano, como lo es en la mayoría de las estaciones sobre grava, representan un bajo contraste de impedancias. Por lo que aceptando el supuesto de la homogeneidad de la rigidez del basamento en toda la cuenta, se puede afirmar que el sitio de la estación DG21 corresponde al suelo de menor rigidez en este estudio. Si se observa la Figura 6.2 siguiendo con el análisis propuesto, la ceniza volcánica de Maipú representa depósitos más rígidos que los finos del norte, mientras que la mayor parte de la grava de Santiago presenta razones espectrales planas, por lo que este depósito podría ser casi tan rígido como el basamento.

La técnica de Nakamura permite estimar el periodo fundamental de vibración de un sitio con bastante facilidad cuando se puede distinguir un peak, es decir que el peak no sólo da cuenta de cuan distintas son las impedancias entre el basamento y el depósito sino que también entrega, el periodo en donde las ondas sísmicas presentan una mayor amplificación. Resulta razonable pensar que este parámetro depende de la rigidez del depósito, sin embargo, existe otra variable que influye en el valor que alcance el periodo, que es la profundidad a la que se encuentra el basamento, o el espesor del depósito. Esta longitud da cuenta de la distancia que deben recorrer las ondas sísmicas, luego un depósito sobre una roca con poca profundidad modificará la onda de distinta manera que un depósito sobre una roca más profunda.

Al comparar los resultados expuestos en esta memoria con los resultados de Pasten (2007), se tienen algunas diferencias principalmente en la dispersión, pero la forma las formas de las curvas promedio son bastante similares, lo que dicta una generalidad en cuanto a la rigidez de

los depósitos, la frecuencia asociada al máximo varía un poco lo que puede explicarse con la distancia que existen entre las ubicaciones de los registros comparados, por lo que no necesariamente las señales están medidas en una misma profundidad del basamento. ni sobre el mismo tipo de depósito.

Los espectrogramas realizados de las razones espectrales dan cuenta de lo estable que resulta esta técnica con distintos registros al menos para estimar el periodo fundamental. Como lo establece la teoría si el depósito es sólo excitado para señales tipo ruido blanco se debiera obtener un H/V constante, esto se comprueba al tomar las señales que midan en la madrugada (Figura 7.6 a la Figura 7.11) ya que sus razones espectrales prácticamente no varían, manteniéndose muy estable el valor del periodo fundamental del sitio.

Por último el largo temporal del registro parece no afectar la forma del H/V resultante, ni al valor que toma el periodo natural, por lo que lo realmente relevante es que el registro a utilizar sea una señal de microvibraciones.

10. Bibliografía

Ampuero, A., Van Sint Jan, M. Velocidades de Onda medidas en Santiago con el ensayo de Refracción Sísmica. V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2004

Araneda M., M. Avendaño y C. Merlo “Modelo gravimétrico de la cuenca de Santiago con el ensayo de Refracción Sísmica”. V Congreso de Ingeniería Geotécnica, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2000

Astroza M, Saragoni GR, Yañez F. The Mexico earthquake of September 19,1985. In: Fourth Chilean congress on seismology and earthquake engineering, Viña del Mar, 1986.

Astroza, M., Monge, J. y Varela, J. "Zonificación sísmica de la región metropolitana". En: V Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica. Agosto, 1989.

Bard PY, Tucker BE. “Ridge and tunnel effects: comparing observation with theory.” Bull Seismol Soc Am; 75:905–22. 1985

Bonnefoy-Claudet, S, Köhler, A, Cornou, C, Wathelet, M, and Bard, P-Y “Effects of Love waves on microtremor H/V ratio”. Bulletin of the Seismological Society of America, 98 (1), 288-300. 2008

Bonnefoy-Claudet, S, Baize, S, Bonilla, L F, Berge-Thierry, C, Pasten, C, Campos, J, Volant, P, and Verdugo, R “Site effect evaluation in the basin of Santiago de Chile using ambient noise measurements”. Geophysical Journal International, 176 (3), 925-937. 2009

Boore, D. M. “Can site response be predicted?”, J. Earthquake Engineering 8 Special Issue 1, 1-41. USA. 2004.

Duke CM. Effects of ground on destructiveness of large earthquakes. J Soil Mech Found Div Am Soc Civil Eng 1958;84(SM3):1–23.

Fock, A “Cronología y tectónica de la exhumación en el Neógeno de Los Andes de Chile Central entre los 33° y los 34° S”. Memoria de Magíster en Ciencias y Memoria de Título (Inédito), Departamento de Geología. Universidad de Chile. 2005

Geli L, Bard PY, Jullien B. “The effect of topography on earthquake ground motion: a review and new results”. Bull Seismol Soc Am; 78:42–63. 1988

Gómez A, Saragoni GR. Interpretation of dynamic soil effects on Mexico City Valley using the dense accelerograph network. In: Proceedings of the fifth international, conference on seismic zonation, vol. 1, Nice, France; 1995. p. 747–54.

Gomez A. Interpretation of soil effect at Mexico City valley using accelerograph high-density arrays. PhD thesis, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de México, México; 2002

Instituto Nacional de Normalización “D.S. N°61 Oficializado 2011”. I.N.N, Santiago. 2011.

Kanai K, Yoshizawa S. Relation between the amplitude of earthquake motion and the nature of surface layer. Bull Earthquake Res Inst 1956;34:168–84.

Kanai K. The requisite conditions for the predominant vibration of ground. Bull Earthquake ResInst 1957;35:457–70.

Karzulovic, J. “Sedimentos cuaternarios y aguas subterráneas en la cuenca de Santiago”. Universidad de Chile, Instituto de Geología. 1958

Kawase H, Aki K. A study on the response of a soft basin for incident S, P and Rayleigh waves with special reference to the long duration observed in Mexico City. Bull Seismol Soc Am 1989;79(5): 1361–82.

Kramer,, Steven L., Geotechnical Earthquake Engineering, Publ. Prentice Hall, 1996.

Lachet, C, Hatzfeld, D, Bard, P-Y, Theodulidis, N, Papaioannou, C, and Savvaiddis, A “Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki (Greece) comparison of different approaches”. Bulletin of the Seismological Society of America, 86 (6), 1692-1703. 1996

Leyton, F., Sepúlveda, S., Astroza, M., Rebolledo, S., González, L., Ruiz, S., Fonca, C., Herrera, M. y Lavado, J. "Zonificación sísmica de la cuenca de Santiago, Chile". En: X Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica. Santiago, Chile. 2011.

Molina, J. “Intensidades sísmicas del terremoto del 27 de febrero del 2010 en las 34 comunas del Gran Santiago” Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile. 2010.

Nakamura, Y. “A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface” Quarterly report of railway technical research institute (RTRI), 30(1), 25-33. Japan. 1989.

Pardo, M. (2012). Apuntes del curso Dinámica de Suelos. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.

Pasten C. “Respuesta Sísmica de la cuenca de Santiago” Memoria para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Ingeniería Geotécnica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile. 2007.

Ponce, A. “Evaluación de la amplificación de las ondas sísmicas considerando las condiciones del suelo en la Cuenca de Santiago”, *Memoria de Título (Inédito)*, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil. 1998

Ruiz, S. and Saragoni, G. R. “Free Vibration of Soils during Large Earthquakes”. Soil Dynamic and Earthquake Engineering. 29, 1-16. Chile. 2009

Sezawa K. Possibility of the free—oscillations of the surface layer excited by the seismic waves. Bull Earthquake Res Inst 1930; 13:1–12. 1930

Sezawa K, Kanai K. Decay constants of seismic vibrations of a surface layer. Bull Earthquake Res Inst 1935;13:251–65. 1935

Stern, C., Amini, H., Charrier, R., Godoy, E., Hervé, F., Varela, J. “Petrochemistry and age of rhyolitic pyroclastic flows which occur along the drainage valleys of the Río Maipo and Río Cachapoal (Chile) and the Río Yaucha and Río Papagayos (Argentina)”. Revista Geológica de Chile, 23, 39-52. 1984.

Thiele, R. Hoja Santiago. Carta Geológica de Chile N°39, Escala 1:250.000. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago. 21 pp. 1980

Valenzuela, G. “Suelo de fundación del gran Santiago”.Boletín N°33, Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, Chile. 1978.

Varela, J. “Geología del Cuaternario de la Depresión Central de Chile en la zona de la Cuenca de Santiago”, Región Metropolitana, Chile. VI Congreso Geológico de Chile, Santiago, Chile, 593–596. 1991

Woolery, E W and Street, R: “3D near-surface soil response from H/V ambient-noise ratios”. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22 (9), 865-876. 2002

Anexo A: Días Registrados por el Arreglo de Estaciones Sismológicas

Estaciones	Comuna	Año																																			
		Juliano	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13		
DG01	Santiago		1																																		
DG03	Padre Hurtado																																				
DG05	Cerro Santa Lucía		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
DG06	Peñalolén		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
DG11	La Florida																																				
DG12	Estacion Central																																				
DG13	Vitacura																																				
DG15	Pudahuel																																				
DG16	Nuñoa																																				
DG18	Maipo																																				
DG19	La Pintana																																				
DG20	San Bernardo																																				
DG21	Quilicura																																				
DG23	Paine																																				
DG24	El Bosque																																				
DG25	Huechuraba																																				
DG26	Las Condes																																				
DG27	Quinta Normal																																				
DG28	Estacion Central																																				
DG29	Puente Alto																																				
DG30	Maipú																																				
DG31	Santiago																																				
DG32	Colina/Chicureo																																				
DG33	Maipo																																				
DG34	Pirque																																				
DG35	Peñalolén																																				
DG36	San José de Maipo																																				
	Total Julianos		4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	

Anexo D: Variación Diaria de la DG31 entre las 8 pm del 8 de Enero y las 8 pm del 9 de Enero del 2014

Al realizar el análisis expuesto en el capítulo 7.2 para el día juliano 9 del 2014, en otras palabras al calcular las razones espectrales de cada hora del intervalo temporal corresponde a las 24 [hrs] desde las 8 pm del 8 de Enero del 2014 hasta las 8 pm del 9 de Enero del 2014 arrojo algunas razones espectrales con peak bastante significativos que debieran clasificarse como espectros con peak muy marcado, si se observa la Figura D.1 de este anexo estos espectros tienen lugar entre las 12 pm y las 6 pm del día 9 de Enero del 2014.

Según la literatura expuesta en esta memoria, no es esperable que en el sector donde se ubica la estación DG31, que corresponde a un sector de la comuna de Santiago Centro, se tenga alguna razón espectral con un peak de magnitud alta (cercano a 6), además al observar el espectrograma de la desviación estándar (σ) cuya barra de colores evidencia máximos de σ cercanos a 3, los que se observan en el mismo rango de las 12 pm y las 6 pm del día 9 de Enero del 2014, se podría explicar que en el registro se tenga algún ruido que no corresponde a la vibración libre del suelo.

Lo anterior se condice con el hecho de que sólo se presenta esta anomalía en un cuarto del rango utilizado y que al analizar otro día no se tengan los altos valores aquí mostrados.

(a.1) Variación Diaria DG31 - Santiago Cento

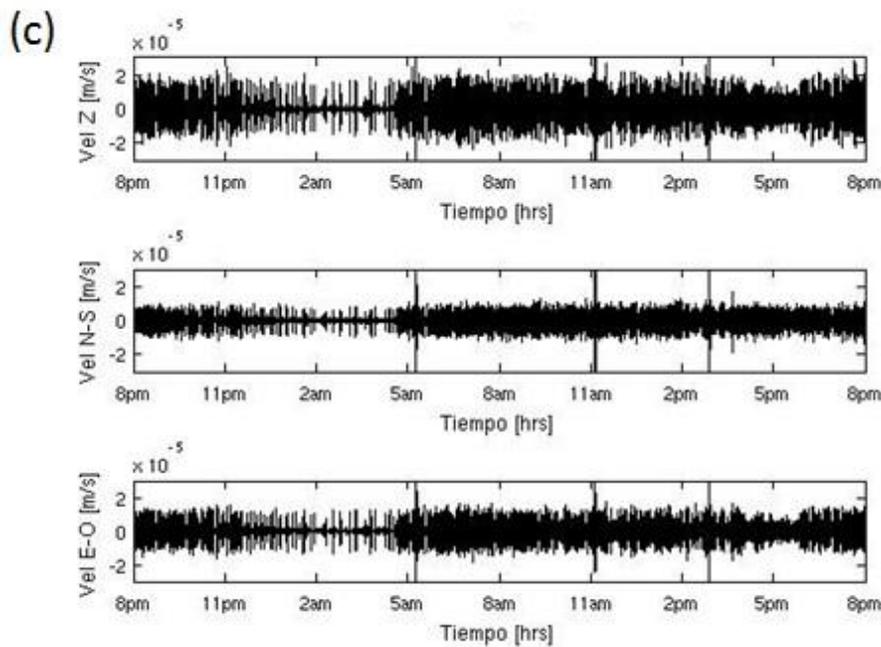
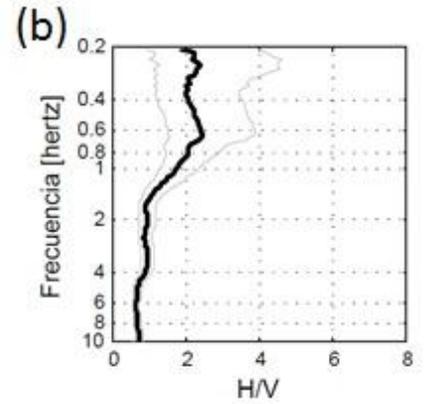
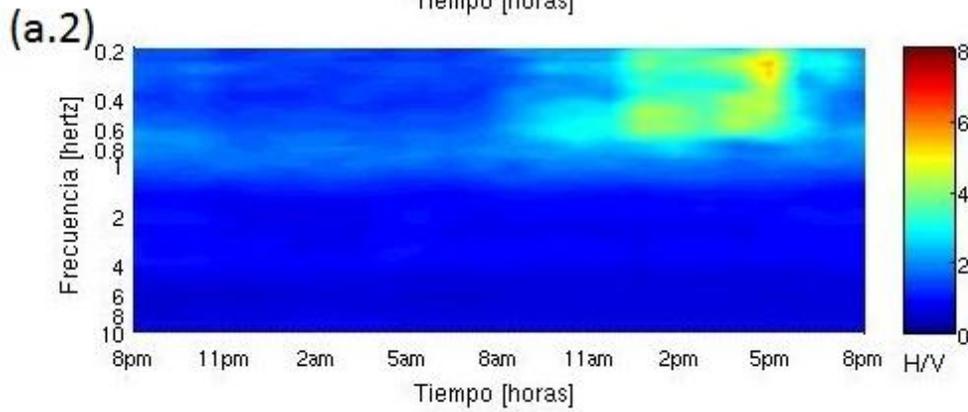
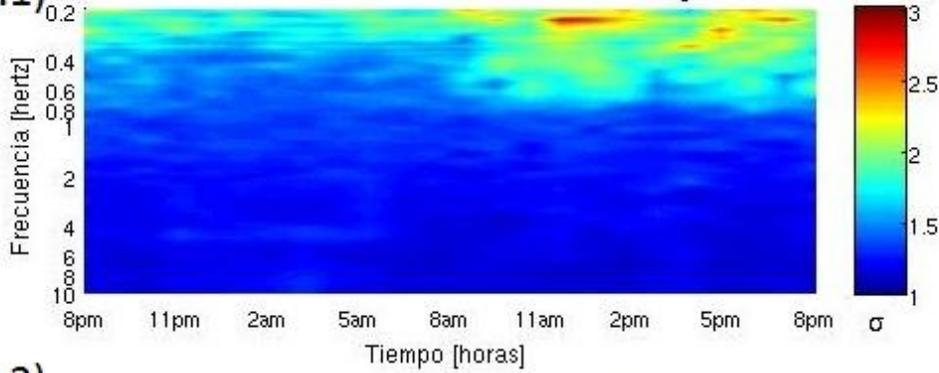


Figura D.I Variación Diaria DG31 - Santiago Centro (Peak Somero) entre las 8pm del 8 de Enero y las 8 pm del 9 de Enero 2014