



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

**DETERMINACIÓN DE EFECTOS DE SITIO EN LAS ESTACIONES
SISMOLÓGICAS DE LA REGIÓN DE TARAPACÁ**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

LUIS RAMIRO PINTO MORALES

PROFESOR GUÍA:
CÉSAR PASTÉN PUCHI

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SERGIO RUIZ TAPIA
FELIPE LEYTON FLOREZ

SANTIAGO DE CHILE

2016

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil con mención en
Estructuras, Construcción y Geotecnia.
POR: Luis Ramiro Pinto Morales.
FECHA: 15 de Enero de 2016
PROFESOR GUÍA: César Pastén Puchi.

DETERMINACIÓN DE EFECTOS DE SITIO EN LAS ESTACIONES SISMOLÓGICAS DE LA REGIÓN DE TARAPACÁ

El objetivo de este trabajo es estudiar los efectos de sitio en 35 estaciones sismológicas de la Región de Tarapacá, analizando registros del terremoto de Iquique 2014, otros eventos de menor magnitud y vibraciones ambientales. A partir de los resultados, se logra determinar la distribución de amplificaciones sísmicas en la región y mejorar el entendimiento del comportamiento de los suelos ante futuros eventos sísmicos. En este trabajo se calculan razones espectrales H/V de vibraciones ambientales medidas con sismógrafos de banda ancha, acelerógrafos y sismógrafos uniaxiales, que permiten obtener la frecuencia predominante del depósito de suelos. También, se calculan espectros de respuesta normalizados, razones espectrales H/V y espectros de respuesta normalizados con respecto a una estación de referencia a partir de registros de aceleración de eventos de magnitud superior a 5. Los resultados de este estudio confirman que una gran cantidad de estaciones se emplaza sobre suelos rígidos o afloramientos rocosos que se caracterizan por tener razones espectrales planas calculadas a partir de vibraciones ambientales y sismos. Las estaciones emplazadas sobre depósitos de suelos se encuentran principalmente en la ciudad de Iquique, sobre depósitos eólicos o marinos, y en la depresión intermedia, principalmente en las ciudades de Huará, Pozo Almonte y Pica, sobre secuencias sedimentarias. Estos depósitos de suelo tienen poca profundidad y un alto contraste de impedancia con el basamento rocoso. Las razones espectrales de vibraciones ambientales y sismos tienen frecuencias predominantes entre 1 y 8 Hz que coinciden con los peaks de los espectros de respuesta. Estos resultados concuerdan con mapas geológicos, perfiles de velocidad de onda de corte y microzonificaciones propuestas por otros estudios. En algunas de estas estaciones también se detecta una disminución de la frecuencia predominante durante el terremoto de Iquique 2014 que puede atribuirse a la degradación de rigidez de los suelos a grandes deformaciones. Finalmente, a partir de la comparación de resultados de acelerógrafos y sismógrafos de banda ancha, se desestima el uso de ruido de aceleración para el cálculo de razones espectrales H/V por la baja sensibilidad de los acelerógrafos ante vibraciones del suelo.

“Nuestra recompensa se encuentra en el esfuerzo, no en el resultado. Un esfuerzo total es una victoria completa”

Mahatma Gandhi

Agradecimientos

Hay muchas personas que hicieron posible este trabajo además de mí y a quienes quisiera agradecer.

En primer lugar quisiera agradecer a mi familia. A mis padres, por su apoyo incondicional y el ejemplo de personas que fueron, son y serán para mí. Agradecer también a mis hermanos Javiera, Olivia y Francisco, y mis sobrinos Diego y Emiliano, por su cariño, apoyo y siempre ser motivo de alegría.

Tengo muchas amistades a las cuales quiero manifestarle la alegría de haberlos conocido y contar con ellos. En primer lugar, a mis compañeros de colegio por hacer de los partidos de futbol y los fines de semana momentos que atesoro mucho. A mis amigos de la u: Orrego, Jaque, Caleb, Fabio, Emilio, Fabo, Jones, Felipe Sánchez, Guille, Isaías, Iván, Miguel, Seba, Zolezzi y Javier, gracias por llenar mi paso por la universidad de momentos felices de mi vida.

A los amigos de la Geo Pecera: José, Emilia, Héctor, Manuel, Miguel e Ignacio, por intercalar momento de trabajo con su amistad.

Particularmente agradecer a Benjamín por dar el pie inicial a esta memoria al facilitarme su base de datos de registros sísmicos. Sin su ayuda este trabajo hubiese tardado una cantidad de esfuerzo y de tiempo mucho mayor.

No me puedo olvidar de Paula quien con su amor y cariño siempre estuvo ahí apoyándome y haciéndome muy feliz. Yo por mi parte, intenté hacer lo mismo por ella.

Finalmente quisiera agradecer a mi profesor guía, César Pastén, quien siempre se mostró presente y preocupado por mi trabajo. Gracias por su compañía, buena disposición y apoyo constante.

Este trabajo fue parciamente financiado por fondos de titulación del Departamento de Ingeniería Civil.

Tabla de Contenido

1.	Introducción	11
1.1.	General.....	11
1.2.	Objetivo General.....	12
1.3.	Objetivo Específicos	12
1.4.	Estructura del Trabajo	12
2.	Marco Geológico y Sismológico	13
2.1.	Geomorfología de la Región de Tarapacá	13
2.2.	Geomorfología de Iquique-Alto Hospicio.....	15
2.3.	Sismología de la Región	15
2.4.	Terremoto de Tocopilla 2007	16
2.5.	Terremoto de Iquique 2014.....	17
3.	Respuesta Sísmica de un Depósito de Suelo.....	18
3.1.	Propagación de Ondas Sísmicas.....	18
3.2.	Efectos de Sitio.....	19
3.3.	Método de las Razones Espectrales H/V.....	20
3.3.1.	Formulación Teórica del Método de las Razones Espectrales H/V	20
3.3.2.	Ventajas y Desventajas del Método de las Razones Espectrales H/V	22
4.	Procesamiento de Datos.....	23
4.1.	Razones espectrales H/V de vibraciones ambientales.....	23
4.1.1.	Identificación de ruido estacionario.....	23
4.1.2.	Cálculo de Razones Espectrales	25
4.1.3.	Resultados Esperados.....	27
4.2.	Razones Espectrales de Registros de Eventos Sísmicos	27
4.3.	Espectros de Respuesta.....	29

5.	Base de Datos	31
5.1.	Estaciones Sismológicas	31
5.2.	Eventos Sísmicos	38
6.	Resultados	42
6.1.	Razones Espectrales	42
6.1.1.	Razones Espectrales de Vibraciones Ambientales	42
6.1.2.	Razones Espectrales de Registros de Eventos Sísmicos	46
6.2.	Espectros de Respuesta en las Estaciones	49
6.3.	Espectros de respuesta normalizados por espectro de referencia en la ciudad de Iquique	53
7.	Discusión	55
7.1.	Atenuación de Aceleración en el Terremoto de Iquique 2014	55
7.2.	Comparación entre Razones Espectrales H/V y Espectros de Respuesta	56
7.3.	Comparación entre Espectros de Respuesta Normalizados y Razones Espectrales H/V	57
7.4.	Condiciones Locales de la Región de Tarapacá	58
7.4.1.	Ciudad de Iquique	58
7.4.2.	Alto Hospicio	61
7.4.3.	Pozo Almonte y Huara	62
7.4.4.	Pica	64
7.4.5.	Quebrada de Aricilda	65
7.4.6.	Cuya	65
7.4.7.	Pisagua	66
7.5.	Comparación con Otros Estudios	66
7.5.1.	Comparación de las Frecuencias Predominantes	66
7.5.2.	Comparación de Razones Espectrales H/V	67

8.	Conclusiones y Recomendaciones	69
8.1.	Conclusiones	69
8.2.	Recomendaciones	70
9.	Bibliografía	72

Índice de Tablas

Tabla 1: Intensidades registradas para el Terremoto de Tocopilla en algunas ciudades del Norte (Astroza and Astroza, 2010).	17
Tabla 2: Características de las estaciones sismológicas de la Región de Tarapacá	33
Tabla 3: Disponibilidad de datos en las estaciones sismológicas.....	37
Tabla 4: Eventos Sísmicos.....	39
Tabla 5. Parámetros de Análisis.	42
Tabla 6. Tipo de Análisis y Ventanas Seleccionadas por Estación.....	43
Tabla 7. Estaciones en suelo de Iquique.....	53
Tabla 8. Comparación de las frecuencias peaks obtenidas a través del método de las razones espectrales H/V para eventos sísmicos y vibraciones ambientales y espectros de respuesta. .	56
Tabla 9. Comparación de las frecuencias peaks obtenidas por función de transferencia empírica, método de las razones espectrales H/V para eventos y espectros de respuesta para las estaciones ubicadas en suelo para las estaciones ubicadas en suelo de la ciudad de Iquique.....	57
Tabla 10. Comparación entre estaciones en Alto Hospicio (T08A y ALHO).	61
Tabla 11: Comparación de los resultados de teoría unidimensional y de razones espectrales H/V.	67

Índice de Figuras

Figura 1: Mapa de la Geomorfología de la Región de Tarapacá (Börgel, 1983).....	14
Figura 2: Mapa de la Geomorfología de las Ciudades de Iquique y Alto Hospicio (Marquardt, 2008).	14
Figura 3: (a) Registros históricos de la Región de Tarapacá. (b) grado de acoplamiento entre las placas (Métois et al., 2013). (C) Mapa con la ubicación de los epicentros de los terremotos de Tarapacá 2005, Tocopilla 2007, Iquique 2014 y su réplica del 3 de abril (Datos del USGC).....	16
Figura 4: Deformaciones producidas por las Ondas de Cuerpo: Ondas P (a) y S (b) (Kramer, 1996)	18
Figura 5: Deformaciones producidas por las ondas superficiales: Ondas Rayleigh(a) y Ondas Love (b) (Kramer, 1996).....	19
Figura 6: Registro del Terremoto de Iquique de 2014 para la Estación de Iquique Idiem (IQID), componente vertical.....	19
Figura 7: Ventanas de ruido estacionario en la estación Iquique Idiem (IQID), campaña post terremoto 2014. (a) Señal original cruda, (b) ventanas seleccionadas.	24
Figura 8: Esquema del cálculo de razones espectrales en una ventana de ruido estacionario de señal proveniente de un sismógrafo Kinematics Rangers en las inmediaciones de la estación Iquique Escuela (IQES).	26
Figura 9: Registro del Terremoto de Iquique 2014, Estación ALHO.	28
Figura 10: FFT y suavizado al registro de la estación Alto Hospicio (ALHO) para el Terremoto de Iquique 2014.....	28
Figura 11: H/V para los registros de Alto Hospicio (ALHO).	29
Figura 12: Espectros de respuesta normalizados para componente Norte-Sur de la estación Pica (PICA).....	30
Figura 13: Estaciones sismológicas de la Región de Tarapacá (Google Earth)	31
Figura 14: Estaciones sismológicas de Iquique y Alto Hospicio (Google Earth)	32
Figura 15: Modelos de los Acelerógrafos. QDR (A), Basalt (B), CMG-5 (C), ETNA (D), SMA-1 (E). Sismógrafo STS-2 (F).	36
Figura 16: Histograma de ocurrencia según magnitud.....	38
Figura 17: Eventos sísmicos analizados en este trabajo. Ubicación de los hipocentros en (a) planta y (b) profundidad en corte EW (USGS)	41

Figura 18. Resultados de las razones espectrales de vibraciones ambientales. En azul se muestran las razones espectrales de sismógrafos de banda ancha, en magenta las de ruido de acelerógrafos, y en verde las de sismógrafos uniaxiales Rangers de Kinematics.....	44
Figura 19. Razones espectrales de vibraciones ambientales medidas con sismógrafos de banda ancha y acelerógrafos en las estaciones del Centro Sismológico Nacional (CSN).....	45
Figura 20. Resultados de las razones espectrales de eventos sísmicos.....	47
Figura 21. Comparación del método de las razones espectrales H/V de vibraciones ambientales y de eventos sísmicos.....	48
Figura 22. Espectros de respuesta normalizados para las estaciones de la Región de Tarapacá, componente Norte Sur.....	50
Figura 23. Espectros de respuesta normalizados para las estaciones de la Región de Tarapacá, componente Este-Oeste.	51
Figura 24. Espectros de respuesta normalizados para las estaciones de la Región de Tarapacá, componente vertical.....	52
Figura 25. Espectros de respuesta normalizados con respecto a Iquique Hospital (T06A) para (a) Iquique Escuela (IQEC), (b) Iquique Cerro Dragón (T01A), (c) Iquique Ruta A16 (T02A), (d) Iquique Regimiento Granaderos (T03A) y (e) Iquique Cavanca (TA02).	54
Figura 26. Atenuación de aceleraciones máximas para el Terremoto de 2014 según Saragoni y Ruiz (2005). (a) Componente norte-sur y (b) este-oeste.....	55
Figura 27. Razones espectrales H/V y espectros de respuesta normalizados para estaciones aledañas a sondajes en Iquique (Becerra 2014). Las estaciones corresponden a (a) Iquique Regimiento Granaderos (T03A), (b) Iquique Cruz Roja (T04A), (c) Iquique Hospital RENADIC (T06A) y (d) Iquique Hospital ONEMI (T06A).....	59
Figura 28. Perfil de velocidades de Montalva and Bastías (2014), razones espectrales H/V y espectros de respuesta normalizados para Iquique Serviu (T05A).	60
Figura 29. Razones espectrales H/V y espectros de respuesta normalizados para las estaciones de Alto Hospicio.....	62
Figura 30. Razones espectrales H/V y espectros de respuesta normalizados para las estaciones de Pozo Almonte (T07A) y Huará (T10A).....	63
Figura 31. Razones espectrales H/V y espectros de respuesta normalizados para las estaciones de Pica (PICA y T13A).....	64
Figura 32. Estación Quebrada de Aricilda (PB11).....	65

Figura 33. Razones espectrales H/V y espectros de respuesta normalizados para las estaciones de Pisagua (PISA, PSGCX y T09A)..... 66

Figura 34. Comparación entre las curvas de razones espectrales calculada por Montalva y Bastías (2014) y las calculadas a partir de registros sísmicos. 68

1. Introducción

1.1. General

El contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana acumula grandes cantidades de energía debido al movimiento relativo entre ambas, a una tasa de convergencia de 6,6 cm/año aproximadamente (Kendrick et al., 2003). La liberación de esta energía ocasiona una gran cantidad de eventos sísmicos de mediana y gran magnitud, haciendo que Chile sea uno de los países con mayor sismicidad en el mundo.

El caso de la Región de Tarapacá demanda una especial atención, pues en la zona se tiene una gran cantidad de energía acumulada hasta la fecha (Chlieh et al., 2011; Scholz and Campos, 2012), que no fue completamente liberada durante el Terremoto de Iquique del 1 de abril de 2014 (Lay et al., 2014; Ruiz et al., 2014). El mencionado terremoto tuvo una magnitud de momento de 8.2 y el inicio de su ruptura se produjo en el contacto entre las placas frente a las costas de Pisagua.

Entre la zona de ruptura que origina un evento sísmico y la superficie en el terreno, se tiene un medio altamente heterogéneo como la litósfera y los diferentes depósitos de suelo. Esto ocasiona que el movimiento resultante en superficie se vea modificado de un lugar a otro por una variada cantidad de elementos: trayectoria de los rayos, tipo de depósito de suelo, presencia de singularidades topográficas, etc. Este fenómeno es conocido como “Efecto de Sitio” o bien “Amplificación de Suelos”.

Es aceptado tanto por la sismología como por la ingeniería que las condiciones geológicas y geotécnicas de cada sitio inciden directamente en el movimiento sísmico resultante en superficie durante un evento (Seed and Idriss, 1969). Variados autores han observado este fenómeno en el país para distintos casos: en la cuenca de Santiago (Pasten, 2007; Pastén et al., 2015), en las ciudades de Curicó y Talca (Leyton et al., 2013), y para las ciudades de Arica, Iquique y Alto Hospicio (Becerra, 2014) entre otras. En este último caso, los autores incluyen propuestas de microzonificación basadas en mediciones hechas post terremoto de Iquique 2014.

En este trabajo se evalúan los efectos de sitio de las estaciones sismológicas de la Región de Tarapacá a través del cálculo de las razones espectrales H/V (Nakamura, 1989). Este corresponde a un método geofísico no intrusivo el cual permite estimar el periodo predominante de un depósito de suelo a partir de mediciones de ruido ambiental tomadas en superficie (Nakamura, 1989; Chavez-Garcia and Cuenca, 1998).

En la práctica, el método es apropiado principalmente para la obtención del período predominante de un depósito de suelo y en menor medida para estimar amplificación sísmica (Lermo and Chávez-García, 1993; Tokimatsu and Kōgakkai, 1995; Bonnefoy-Claudet et al., 2009)

1.2. Objetivo General

Determinar efectos de sitio en las estaciones sismológicas de la Región de Tarapacá, utilizando registros sísmicos de distinta magnitud y vibraciones ambientales.

1.3. Objetivo Específicos

- Confeccionar una base de datos con sismos registrados en las estaciones sismológicas de la Región de Tarapacá, incluyendo estaciones de la Oficina Nacional de Emergencias del Ministerio del Interior (ONEMI), la Red Nacional de Acelerógrafos del Departamento de Ingeniería Civil (RENADIC) y el Centro Sismológico Nacional (CSN).
- Recolectar información geológica/geotécnica de los sitios donde se emplazan las estaciones.
- Procesar los registros de aceleración para obtener espectros de respuesta y razones espectrales H/V.
- Utilizar mediciones de ruido ambiental en las estaciones para determinar razones espectrales H/V y comparar los resultados con las razones espectrales obtenidas a partir de registros sísmicos.

1.4. Estructura del Trabajo

Este trabajo se divide en 7 capítulos además de la Introducción. El Capítulo 2 describe el marco geológico y sismológico de la Región de Tarapacá, tanto a nivel general como específico para las ciudades de Iquique y Alto Hospicio, y además describe brevemente los Terremotos de Iquique 2014 y Tocopilla 2007. El Capítulo 3 explica los fundamentos teóricos de este trabajo, incluyendo conceptos como efecto de sitio, tipos de ondas sísmicas y el método de las razones espectrales H/V, o método de Nakamura. El Capítulo 4 describe el procesamiento de los registros, tanto de ruido ambiental como de eventos sísmicos. Para esto se explica el tratamiento de las señales para obtener razones espectrales y espectros de respuesta. El Capítulo 5 presenta la base de datos, que incluye eventos de magnitud mayor o igual a 5. También, presenta mapas con la ubicación de los hipocentros en latitud, longitud y profundidad. El Capítulo 6 expone los resultados del procesamiento de datos, incluyendo razones espectrales y las respuestas por estación. El Capítulo 7 discute la concordancia entre los diferentes métodos por estación y se contrastan con otros estudios. Finalmente, el Capítulo 8 expone las principales conclusiones de este trabajo.

2. Marco Geológico y Sismológico

La Región de Tarapacá se encuentra acotada aproximadamente entre los paralelos 19° y 21°32' latitud sur, y los meridianos 68°40' y 70°15' longitud oeste. Limita al norte con la Región de Arica y Parinacota, al sur con la Región de Antofagasta, al este con Bolivia y al Oeste con el Océano Pacífico. Se trata de una región de 42.225 km², de características desérticas, su principal centro urbano corresponde al conglomerado entre la capital, Iquique, y la ciudad de Alto Hospicio, las cuales concentran la mayor parte de la población de la zona.

Esta región se encuentra expuesta a los eventos sísmicos originados por el contacto de la Placa de Nazca y Sudamericana. Este ambiente de convergencia, originó también las unidades Cordillera de los Andes, Depresión Central y Cordillera de la Costa probablemente durante el Oligoceno Superior-Plioceno Medio, que corresponde al periodo en que se tuvo la máxima compresión entre ambas placas (Thiele and Cubillos, 1980).

2.1. Geomorfología de la Región de Tarapacá

En la región se pueden identificar diferentes franjas longitudinales que definen la geomorfología de la región (Börgel, 1983).

Las Planicies Costeras son de escasa extensión dada la presencia de Farellones Costeros que dan inicio a la Cordillera de Costa. Estos farellones levantan el terreno abruptamente a alturas de 800 m sobre el nivel del mar. Este rasgo geomorfológico sólo es interrumpido por las quebradas exorreicas y a algunas planicies de poco desarrollo.

La Cordillera de la Costa se presenta como una cadena abrupta y en algunos casos con contacto directo al mar. Hacia el interior, su modelado de montaña ha evolucionado sin escurrimientos superficiales organizados, dando origen a grandes depresiones salinas, o bien salares.

La Depresión Intermedia, de ancho aproximado de 40 km, está constituida por pampas y pampillas que son mesetas inclinadas, las cuales tienen una cota aproximada de 600 m.s.n.m. al oeste y una cota aproximada de 1500 m.s.n.m. al este. La pampa de mayor extensión corresponde a la Pampa del Tamarugal. Estas pampas se encuentran interrumpidas sólo por la presencia de quebradas. Hacia el este de estas pampas y pampillas, se ubican piedemontes constituidos principalmente por depósitos aluviales, seguidos de las Pre-cordillera entre los ríos Lauca y Loa. Finalmente, se ubica La Cordillera Prealtiplánica. La geomorfología de la Región se resume en la Figura 1.

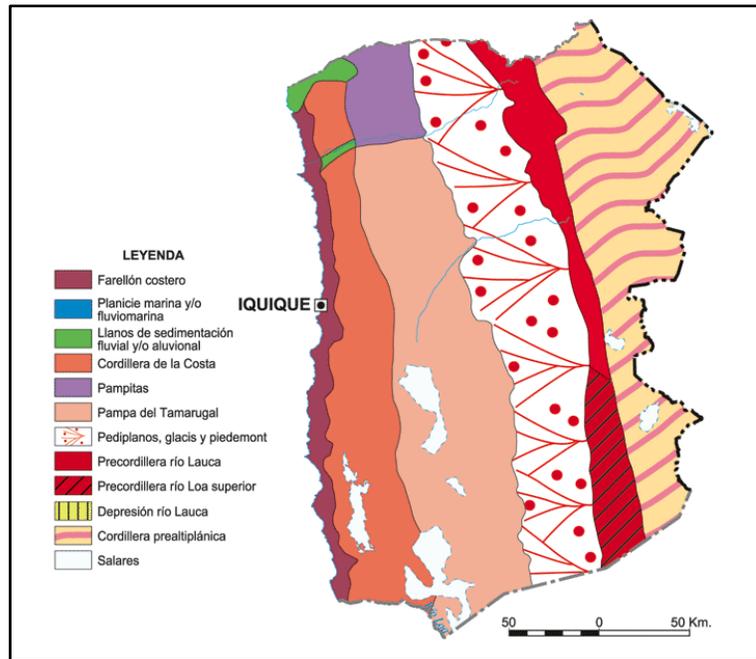


Figura 1: Mapa de la Geomorfología de la Región de Tarapacá (Börgel, 1983)

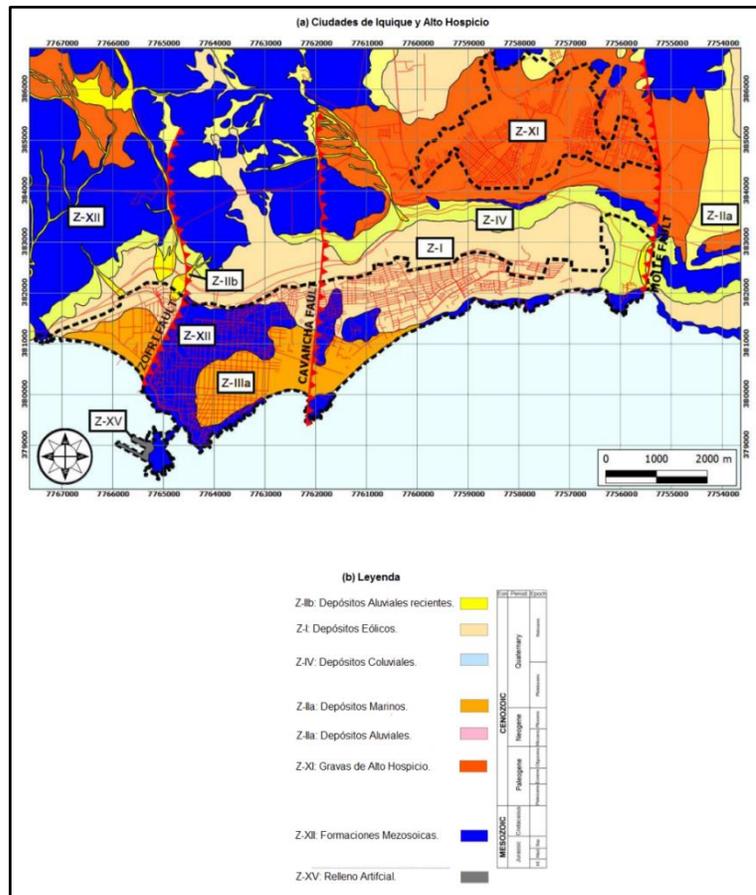


Figura 2: Mapa de la Geomorfología de las Ciudades de Iquique y Alto Hospicio (Marquardt, 2008).

2.2. Geomorfología de Iquique-Alto Hospicio

Esta zona presenta una geología heterogénea, la cual se encuadra dentro del sistema de fallas de Atacama, considerada como uno de los sistemas de fallas más antiguos y grandes del país acorde a Marquardt (2008).

La zona urbana de Iquique se encuentra atravesada por varias fallas. Entre ellas se encuentran las fallas ZOFRI, Cavanca y El Molle. La mayoría posee un rumbo Este-Oeste predominantemente, y un manteo aproximado de 60°S, con la excepción de la falla El Molle, la cual posee un manteo de aproximadamente 30°N.

Los suelos de la zona centro-norte de la ciudad muestran presencia de sedimentos cenozoicos, los que recubren el basamento rocoso ígneo del jurásico superior, compuesto por rocas intrusivas y rocas piroclásticas. En los alrededores de la Falla ZOFRI, se identifican depósitos marinos, con una profundidad baja hasta la roca madre.

En la Zona sur, se distingue la presencia de depósitos eólicos como el Cerro Dragón, los cuales están intercalados con depósitos marinos. Nuevamente, aproximándose a la zona de la Falla El Molle, se identifica la presencia de depósitos marinos.

La ciudad de Alto Hospicio, está ubicada al sur-este de Iquique, sobre un escarpado que marca el inicio de la Cordillera de la Costa a unos 550 metros sobre el nivel del mar. Los suelos de esta ciudad se tratarían principalmente de gravas consolidadas por la presencia de halitas, las cuales actúan como un agente cementante. Muchas Fallas se han identificado en la Ciudad, sin embargo, éstas no se encuentran definidas apropiadamente, a excepción de la Falla El Molle, la cual continúa desde la costa. La Figura 2 muestra la geomorfología de estas ciudades.

2.3. Sismología de la Región

El ambiente subductivo entre las placas de Nazca y Sudamericana en el Norte Grande posee un ángulo de entre 25° a 30° (Madariaga, 1998), y se tiene una velocidad de convergencia entre las placas de entre 6 a 7 centímetros por año (Angermann et al., 1999; Kendrick et al., 2003).

Mediante estudios paleo-sísmicos (Vargas et al., 2005; Vargas et al., 2014), se tienen registros de un mega-terremoto ocurrido aproximadamente en el año 1450. Además, considerando los registros históricos, se tienen los terremotos de 1545, 1615 y 1768, los cuales basándose en el daño que ocasionado en los escasos pueblos existentes en dichas fechas, se estima que tuvieron una magnitud mayor a 7.0 (Montessus de Ballore, 1913). El último terremoto registrado en la zona con una magnitud de momento mayor a 8.5, ocurrió el 9 de mayo de 1877 (Ruiz et al., 2014). Ver Figura 3, parte (a).

Entre el terremoto de Iquique del 1 de Abril de 2014 habían transcurrido 137 años desde el último mega-terremoto el cual corresponde al de 1877, Mw=8.6. Entre estos eventos, se tienen

terremotos de magnitud de momento cercana a 8 en los años 1933, 1967 y 2007 (Malgrange and Madariaga, 1983; Peyrat et al., 2010; Ruiz et al., 2014).

Estas condiciones implican una gran cantidad de energía acumulada en la zona hasta antes del primero de abril de 2014 y se tienen aún zonas altamente acopladas en el Norte de Chile (Métois et al., 2013), con grandes cantidades de energía las que serían suficientes para producir terremotos con una magnitud M_w mayor a 8.0 (Lay et al., 2014; Ruiz et al., 2014).

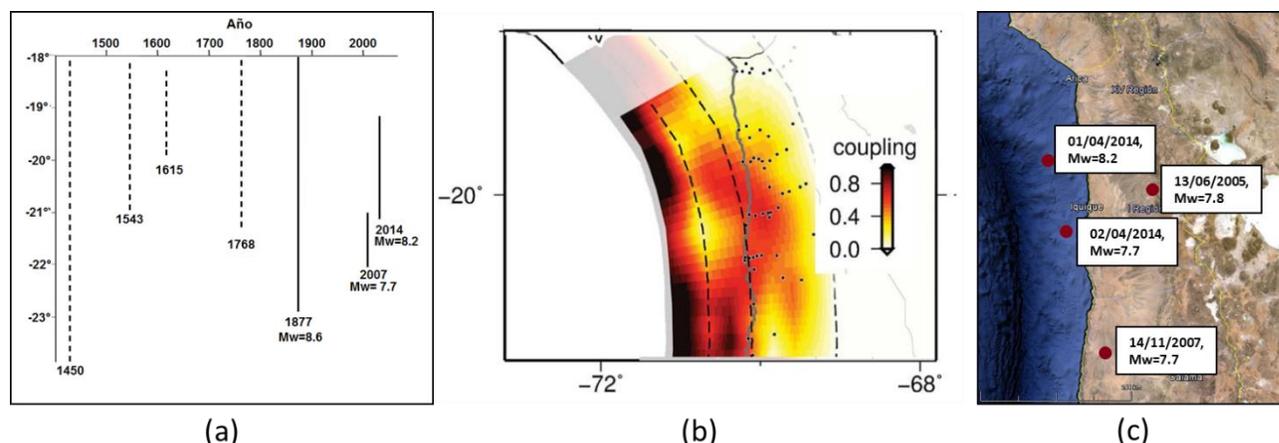


Figura 3: (a) Registros históricos de la Región de Tarapacá. (b) grado de acoplamiento entre las placas (Métois et al., 2013). (C) Mapa con la ubicación de los epicentros de los terremotos de Tarapacá 2005, Tocopilla 2007, Iquique 2014 y su réplica del 3 de abril (Datos del USGC)

2.4. Terremoto de Tocopilla 2007

El terremoto de Tocopilla fue un terremoto de tipo Interplaca ocurrido el 14 de noviembre de 2007 a las 15:41 UTC. El epicentro fue fijado aproximadamente a 25 km al sur de Tocopilla y a 150 km al nor-noroeste de Antofagasta. Tuvo una magnitud de momento de 7.7, teniendo un área de ruptura que se propagó 50 km al norte y 100 km al sur. Tuvo un máximo de desplazamiento 3 metros (Delouis et al., 2009; Peyrat et al., 2010). Este evento solo liberó un 2,5% de la energía acumulada desde el último mega-terremoto ocurrido en 1868 (Béjar-Pizarro et al., 2010). La localización de este evento acorde a datos del USGS, se muestra en la Figura 3, parte (c).

Algunas de las intensidades registradas durante este evento para las principales ciudades de las regiones de Tarapacá y Antofagasta se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Intensidades registradas para el Terremoto de Tocopilla en algunas ciudades del Norte (Astroza and Astroza, 2010).

Localidad	Intensidad [I_{MKS}]
Tocopilla	VII
Mejillones	VI-VII
Antofagasta	VI
Calama	V
Iquique	V
Alto Hospicio	V

2.5. Terremoto de Iquique 2014

El terremoto de Iquique fue un terremoto de tipo Interplaca, que ocurrió el día Primero de Abril de 2014 a las 23:46 UTC. Su epicentro, según datos del Centro Sismológico Nacional (CSN), se ubica a 89 kilómetros al suroeste de Cuya y a 83 kilómetros al noroeste de Iquique, sobre el Océano pacífico (Ver Figura 3). Tuvo una profundidad de 38.9 kilómetros según datos del CSN, aunque según datos del USGS (United States Geological Survey), su profundidad fue de solo 20.1 kilómetros. Su magnitud de momento fue de 8.2.

El evento tuvo un momento sísmico de aproximadamente 1.5×10^{21} [N m], con un área de ruptura asociada de 140 kilómetros de largo a través de la interfaz de las placas. La propagación de la ruptura fue unidireccional, desde el hipocentro a través de una aspereza situada a 50 km al sur (Yagi et al., 2014). Indujo deslizamientos de entre 5 a 6 metros en la parte más profunda de la zona de contacto entre placas (Lay et al., 2014; Ruiz et al., 2014; Yagi et al., 2014).

En la zona se tenía una reconocida laguna sísmica, y post terremoto, ocurrió una réplica 24 horas después de magnitud de momento 7.7, y una compleja secuencia sísmica (Ruiz et al., 2014; Schurr et al., 2014). Entre sus réplicas se cuentan más de 60 eventos de magnitud mayor a 4 y 26 eventos de magnitud mayores a 5.

3. Respuesta Sísmica de un Depósito de Suelo

3.1. Propagación de Ondas Sísmicas

Al ocurrir un desplazamiento relativo entre placas tectónicas, parte de la energía liberada se propaga a través de la estructura interna de la Tierra en forma de ondas mecánicas. Estas ondas se clasifican en dos tipos: Ondas de Cuerpo, las cuales viajan por el interior de la Tierra, y las Ondas Superficiales, las que se transmiten a través de la superficie y surgen de la superposición de las Ondas de Cuerpo. Las primeras, se clasifican a su vez en dos tipos: los Ondas P y las Ondas S, y las segundas, en Ondas tipo Rayleigh y tipo Love (Kramer, 1996).

Las Ondas P, también conocidas como compresionales, primarias o longitudinales, consisten en una sucesión de compresión y dilatación del material que atraviesan. El movimiento de las partículas bajo los efectos de este tipo de onda, es paralelo a la dirección de propagación (Ver Figura 4, (a)). Este tipo de onda puede se transmite por medios sólidos y líquidos.

Las Ondas S, también conocidas como secundarias, de corte u ondas transversales, provocan deformaciones por esfuerzos de corte cuando atraviesan un medio. El movimiento de una partícula es perpendicular a la dirección de propagación de la onda (Ver Figura 4, (b)). Usualmente, este movimiento es separado en dos componentes: SV (movimiento en el plano vertical) y SH (movimiento en el plano horizontal). La velocidad de estas ondas depende de la rigidez del material a través del que se propagan. Dado que los fluidos no soportan esfuerzos de cizalle, este tipo de onda, no puede propagarse a través de ellos.

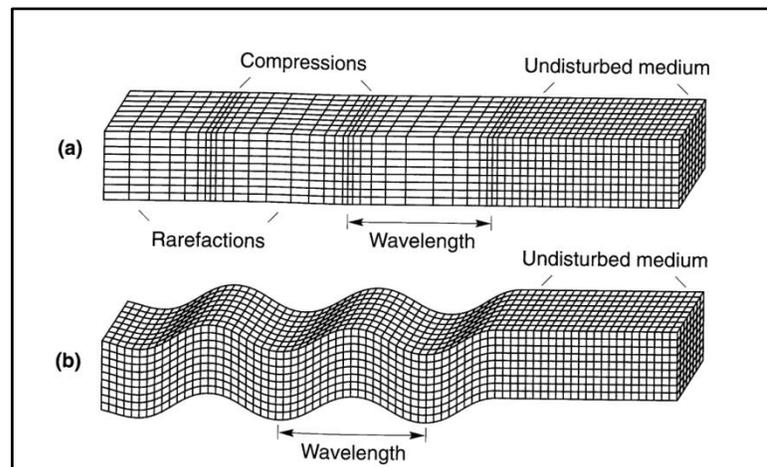


Figura 4: Deformaciones producidas por las Ondas de Cuerpo: Ondas P (a) y S (b) (Kramer, 1996)

Las ondas superficiales surgen de la interacción y de la superposición entre las Ondas de Cuerpo y la superficie de la Tierra. Estas se transmiten solamente a través de la superficie con amplitudes que decaen exponencialmente con la profundidad. Las ondas Rayleigh son producto de la interacción de las Ondas P y SV con la superficie de la Tierra, producen un movimiento vertical y horizontal que dan origen a una rotación elíptica y retrograda a la dirección de

propagación de la Onda en su primer modo (Ver Figura 5, (a)). Las ondas tipo Love surgen de la interacción de las Ondas SH con la superficie de la Tierra, y no tienen componente vertical asociada a su movimiento (Ver Figura 5, (b)).

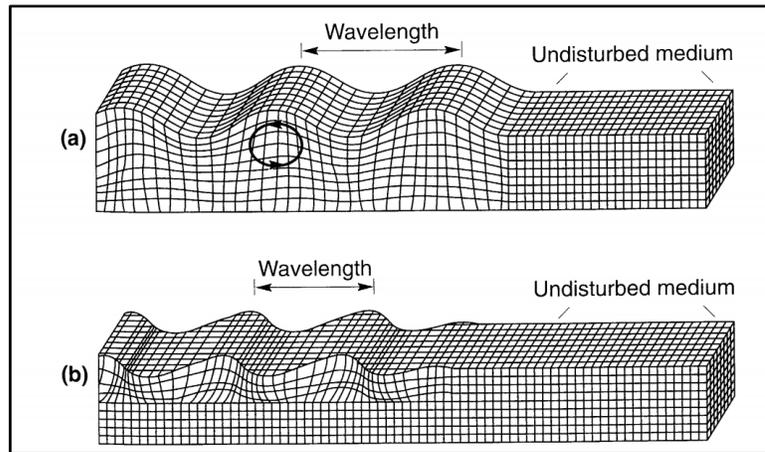


Figura 5: Deformaciones producidas por las ondas superficiales: Ondas Rayleigh(a) y Ondas Love (b) (Kramer, 1996).

Es necesario identificar en los registros de aceleración de un determinado evento los arribos de las Ondas P, Ondas S y las Ondas Superficiales. Dado que la velocidad de las Ondas P es mayor que cualquier otra, su arribo corresponde al primer pulso de energía registrado sobre el nivel de ruido. Las siguientes ondas en arribar corresponden a las Ondas S, que se asocian al inicio del movimiento fuerte, donde se tiene la amplitud máxima del registro. Finalmente, las ondas superficiales, se asocian al decaimiento de la amplitud del registro o bien a la coda del mismo (Ver la Figura 6).

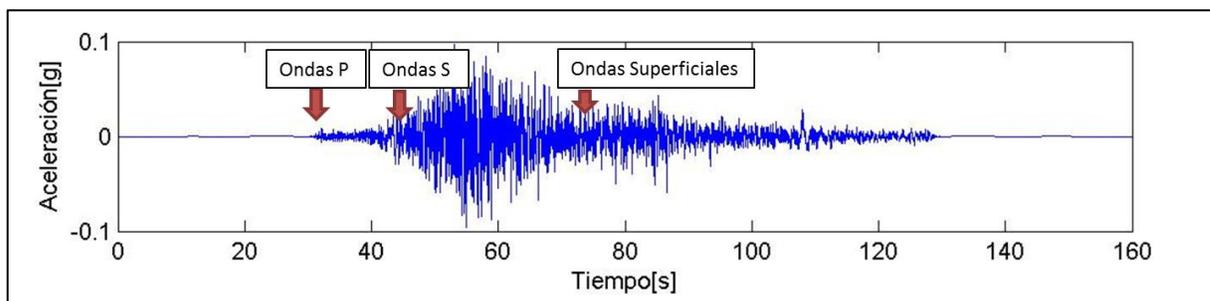


Figura 6: Registro del Terremoto de Iquique de 2014 para la Estación de Iquique Idiem (IQID), componente vertical.

3.2. Efectos de Sitio

La evidencia empírica muestra que la aceleración provocada por un sismo disminuye en la medida que se aleja de la fuente, fenómeno conocido como atenuación. Este fenómeno ha sido identificado por variados autores (Ruiz and Saragoni, 2005; Zhao et al., 2006; Contreras and Boroschek, 2015) y permite estimar la aceleración y la amplificación espectral para una determinada distancia al hipocentro de un determinado evento. Sin embargo, el daño

ocasionado por un terremoto muestra una gran variabilidad, dependiendo del tipo de suelo y singularidades topográficas (Lermo and Chávez-García, 1993).

Los daños observados en depósitos de suelos blandos son generalmente mayores a los de suelos de mayor rigidez, como afloramientos rocosos o gravas. Un caso emblemático de este fenómeno, corresponde a las intensidades reportadas en zonas de Ciudad de México durante el terremoto de Michoacán de 1985 conformadas por arcillas blandas con velocidad de onda de corte menores que 100 m/s (Seed, 1987).

Las condiciones topográficas también influyen en el daño observado. Acorde a la evidencia, la topografía superficial afecta tanto la amplitud como el contenido de frecuencias del movimiento resultante en superficie (Faccioli, 1991; Ashford et al., 1997; Bouckovalas and Papadimitriou, 2005)

3.3. Método de las Razones Espectrales H/V

Este método, también conocido como método de Nakamura (Nakamura, 1989), propone estimar dos aspectos cruciales del comportamiento de un depósito de suelo: el Factor de Amplificación y la frecuencia predominante.

La principal ventaja de este método es que permite determinar estos dos elementos solamente a partir de mediciones de ruido ambiental obtenido desde un sismógrafo en la superficie del depósito de suelo. Debido a lo anterior, es clasificado como un método geofísico no intrusivo.

El método ha arrojado muy buenos resultados como estimador de la frecuencia predominante de un depósito de suelo; sin embargo, no ha presentado gran efectividad a la hora de encontrar el factor de amplificación. Aún cuando el método no arroje un resultado con un peak claro para encontrar la frecuencia predominante, el hecho que la respuesta sea plana, implica que se trata de un suelo altamente competente como gravas o afloramientos rocosos (Lermo and Chávez-García, 1993; Konno and Ohmachi, 1998; Bonnefoy-Claudet et al., 2006; Leyton et al., 2012).

El método ha arrojado resultados consistentes en diferentes lugares tales como Santiago (Pasten, 2007; Pastén et al., 2015), Curicó y Talca (Leyton et al., 2013) o Iquique (Becerra, 2014), dónde los periodos predominantes son consistentes con los datos geológicos y geotécnicos de las respectivas zonas.

3.3.1. Formulación Teórica del Método de las Razones Espectrales H/V

Los depósitos de suelo están generalmente expuestos a vibraciones inducidas por fuerzas naturales, como mareas y viento, y a fuerzas antropogénicas provenientes de fábricas, automóviles, trenes, etc. Estas fuentes generadoras de vibraciones pueden considerarse que en suma producen una sollicitación dinámica aleatoria, lo cual permite que un depósito de suelos tienda a vibrar preponderantemente de acuerdo a su periodo fundamental (Nakamura, 1989; Chavez-Garcia and Cuenca, 1998).

La evidencia empírica indica que un afloramiento rocoso o suelos muy rígidos, no tienen una dirección predominante de movimiento y cualquier amplificación del movimiento en la superficie se debe a la existencia de capas de suelo blando.

De acuerdo a Nakamura (1989), la función de transferencia queda definida por el espectro de Fourier horizontal en superficie, sobre el espectro de Fourier horizontal en el basamento rocoso (Ecuación (1)).

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HR}} \quad (1)$$

Esta razón espectral de ruido ambiental se encuentra influenciada por la Onda Rayleigh, cuyo efecto se puede cuantificar a través de la razón entre el espectro de Fourier vertical en superficie y el espectro de Fourier en el basamento rocoso (Ecuación (2)).

$$E_T = \frac{S_{VS}}{S_{VR}} \quad (2)$$

A fin de expresar una función de transferencia que no considere los efectos de las ondas Rayleigh, se define una nueva función de transferencia (Ecuación (3)).

$$S_{TT} = \frac{S_T}{E_T} \quad (3)$$

Luego, reemplazando (1) y (2) en (3), se tiene:

$$S_{TT} = \left(\frac{\frac{S_{HS}}{S_{HB}}}{\frac{S_{VS}}{S_{VB}}} \right) = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \cdot \frac{S_{VB}}{S_{VS}} \quad (4)$$

Considerando que en (4), los espectros en el basamento rocoso son similares en su componente horizontal y vertical ($S_{HB} \approx S_{VB}$), la función de transferencia del depósito de suelo, queda determinada a partir de espectros horizontales y verticales medidos en superficie (Ecuación (5)).

$$S_{TT} = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (5)$$

Quedando así definido un estimador del factor de amplificación del depósito de suelo a partir de mediciones ambientales tomadas en superficie.

3.3.2. Ventajas y Desventajas del Método de las Razones Espectrales H/V

El método de las razones espectrales H/V ha presentado gran efectividad para encontrar el periodo predominante del depósito del suelo. A nivel nacional, la aplicación del método ha mostrado correlación con datos geológicos y geotécnicos (Pasten, 2007; Trigo, 2007; Leyton et al., 2013; Pastén et al., 2015)

Algunos de los aspectos a considerar del método corresponden a:

1. Su principal ventaja radica en que es una técnica sencilla y de fácil ejecución. La toma de datos y su procesamiento es simple, lo que se traduce en bajos costos.
2. Sirve para determinar los periodos fundamentales de vibración de los suelos (Nakamura, 1989; Chavez-Garcia and Cuenca, 1998), pero no muy bien para determinar la función de amplificación (Lermo and Chávez-García, 1993; Tokimatsu and Kōgakkai, 1995; Bonnefoy-Claudet et al., 2009).
3. No sirve para identificar otros modos de vibración superiores.
4. Funciona muy bien en suelos que no se ven afectados por efectos topográficos.

4. Procesamiento de Datos

4.1. Razones espectrales H/V de vibraciones ambientales

El procesamiento de señales del Método de las Razones Espectrales H/V puede dividirse en dos partes: Identificación de ruido estacionario y cálculo de razones espectrales. A continuación se describen cada una de las etapas.

4.1.1. Identificación de ruido estacionario

Esta etapa se emplea a fin de eliminar ruido transiente del registro de las vibraciones ambientales.

El método de las razones espectrales H/V requiere mediciones de ruido ambiental en superficie por un largo periodo de tiempo: horas e incluso días (Pastén, 2015).

En primer lugar, se divide la señal original en ventanas de tiempos de un largo de 30 a 60 segundos, dependiendo del largo total del registro y se define una ventana de tiempo de largo inferior de aproximadamente 1 segundo. El software Geopsy va haciendo correr la ventana menor en la mayor. Se definen, luego, las siguientes variables:

LTA: Promedio de una Ventana Mayor de largo t_{LTA} .

STA: Promedio de una Ventana Móvil Menor de largo t_{STA} .

$$s = LTA/STA$$

Con esto, se seleccionan ventanas que solamente cumplan con el criterio.

$$s_{min} \leq s \leq s_{max} \quad (6)$$

Dónde s_{max} es un valor umbral máximo y s_{min} un valor umbral mínimo de s . Típicamente, s_{max} va desde 1.5 a 2 y s_{min} de 0.2 a 0.5. La Figura 7 muestra un registro de 30 minutos de vibraciones ambientales registradas con sismógrafos uniaxiales en la estación Iquique Idiem (IQID) y ventanas de 20 segundos seleccionadas con el criterio descrito.

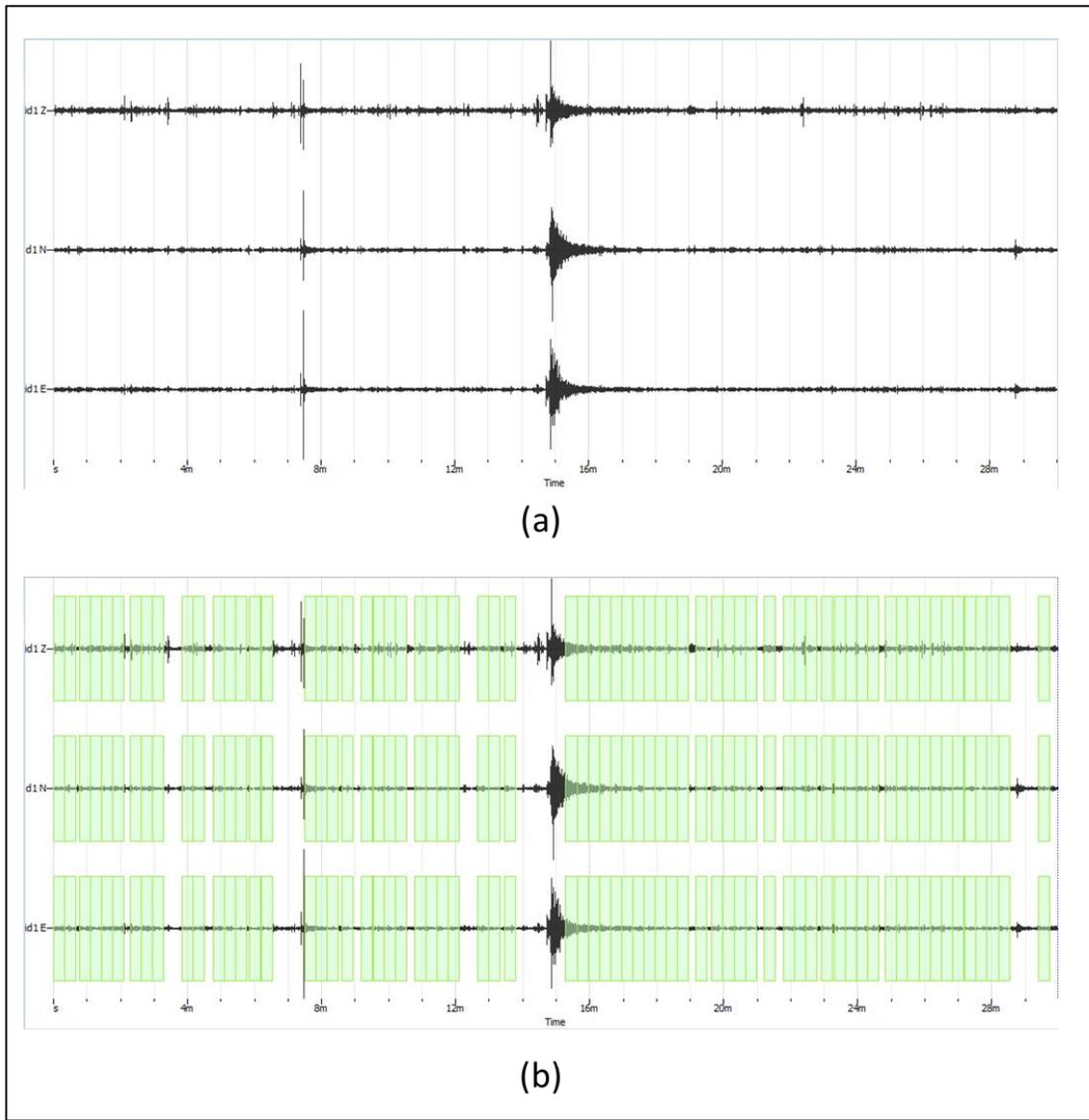


Figura 7: Ventanas de ruido estacionario en la estación Iquique Idiem (IQID), campaña post terremoto 2014. (a) Señal original cruda, (b) ventanas seleccionadas.

4.1.2. Cálculo de Razones Espectrales

El cálculo de razones espectrales contempla los siguientes pasos:

- 1) Para cada ventana, se calculan los espectros de cada componente y se combinan los espectros horizontales SH1 y SH2.

$$SH = \sqrt{\frac{SH1^2 + SH2^2}{2}} \quad (7)$$

- 2) Se divide el espectro horizontal combinado SH por el espectro vertical SV.
- 3) Una vez que se ha realizado este procedimiento para cada ventana, se combinan las razones espectrales de todas las ventanas y se obtiene el promedio y la desviación estándar.

$$H/V_{prom}(f_i) = \frac{\sum_{j=1}^{n_{ventanas}} \log(H/V_{n_j}(f_i))}{n_{ventanas}} \quad (8)$$

$$\sigma_{H/V}(f_i) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_{ventanas}} \log^2(H/V_{n_j}(f_i)) - n_{ventanas} \cdot \log^2(H/V_{prom}(f_i))}{n_{ventanas} - 1}} \quad (9)$$

$$\overline{H/V}_{prom}(f_i) = 10^{H/V_{prom}(f_i)} \quad (10)$$

$$\sigma_{\overline{H/V}}(f_i) = 10^{\frac{\sigma_{H/V}(f_i)}{V}} \quad (11)$$

El cálculo de las razones espectrales se esquematiza en la Figura 8.

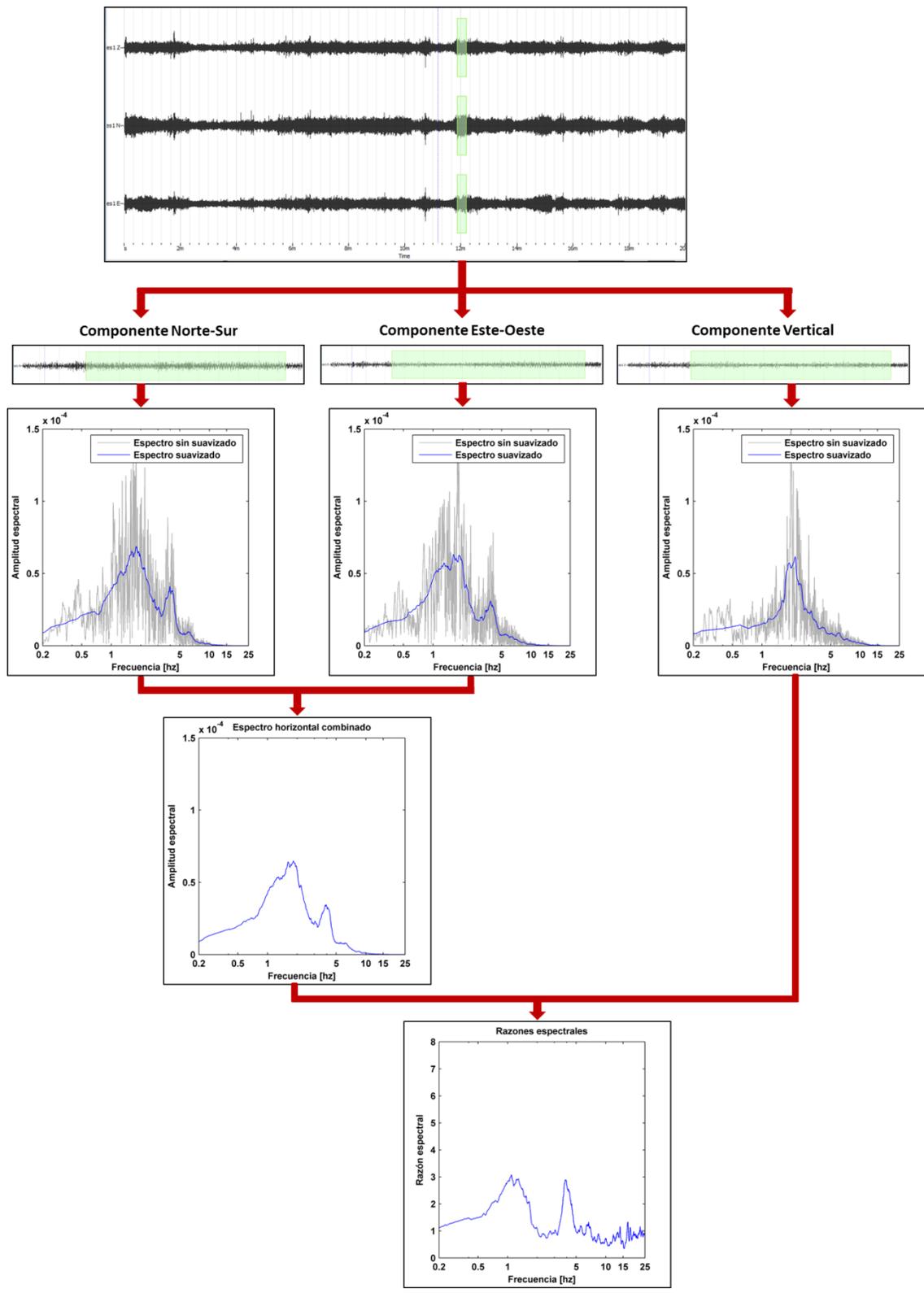


Figura 8: Esquema del cálculo de razones espectrales en una ventana de ruido estacionario de señal proveniente de un sísmógrafo Kinematics Rangers en las inmediaciones de la estación Iquique Escuela (IQES).

4.1.3. Resultados Esperados

Varios autores clasifican sus resultados bajo diferentes criterios (Pasten, 2007; Leyton et al., 2013). Los resultados del tipo respuesta plana son a tribuidos a suelos rígidos, gravas, bolones o afloramientos rocosos. Por otro lado, la presencia de un peak en la curva de las razones espectrales H/V se relaciona con la presencia de 1 capa de suelo sobre un basamento rocoso o bien de un suelo competente.

4.2. Razones Espectrales de Registros de Eventos Sísmicos

Si bien el método de las razones espectrales H/V fue propuesto para ser aplicado a ruido ambiental, se puede proceder de manera análoga para calcular razones espectrales de las transformadas de Fourier de las componentes horizontales y verticales de un evento sísmico. Esta variación en el método se aplicó por primera vez en México (Lermo and Chávez-García, 1993), analizando los 10 segundos de la parte fuerte de registros sísmicos obtenidos en tres ciudades. Los resultados de la aplicación del método de las razones espectrales H/V con registros de eventos sísmicos fueron similares a los obtenidos con vibraciones ambientales.

En este trabajo se consideran los registros sísmicos completos filtrados entre 0.1 y 25 Hz con un filtro tipo Butterworth de orden 4. Para esto, se procede de la siguiente forma:

1. Cálculo de la transformada de Fourier de las tres componentes de un determinado evento sísmico, en una estación específica.
2. Suavizado de las tres transformadas de Fourier. Dado que la transformada de Fourier presenta un carácter inestable, debe ser suavizada de manera previa a la aplicación de las razones espectrales. En este trabajo, se aplicó un suavizado de media móvil, en el que a cada punto se le asigna el promedio de un vecindario de 0,25 Hz (Ver Figura 10).
3. Combinación de las dos componentes horizontales a través de un promedio aritmético y división por la componente vertical. Una vez que se tienen los tres espectros suavizados, se promedian los dos espectros horizontales. Luego este espectro resultante, se divide con el espectro suavizado vertical, lo que permite obtener la razón espectral para ese determinado evento en dicha estación.
4. Luego, se aplica este procedimiento a todos los eventos de una misma estación. Combinándolos se obtiene un promedio del método de las razones espectrales para eventos sísmicos en dicha Estación (Figura 11).

Como ejemplo, se presenta el registro del Terremoto de Iquique 2014 en la Estación de Alto Hospicio (ALHO) (Figura 9) y su respectiva Transformada de Fourier (Figura 10).

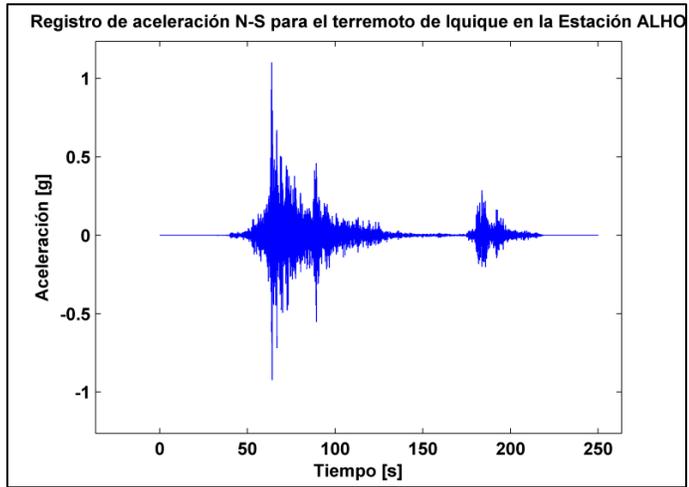


Figura 9: Registro del Terremoto de Iquique 2014, Estación ALHO.

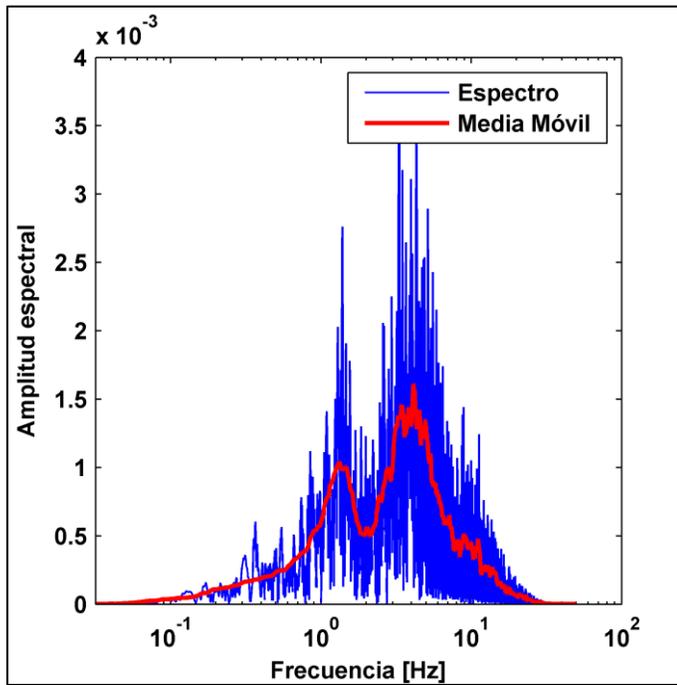


Figura 10: FFT y suavizado al registro de la estación Alto Hospicio (ALHO) para el Terremoto de Iquique 2014.

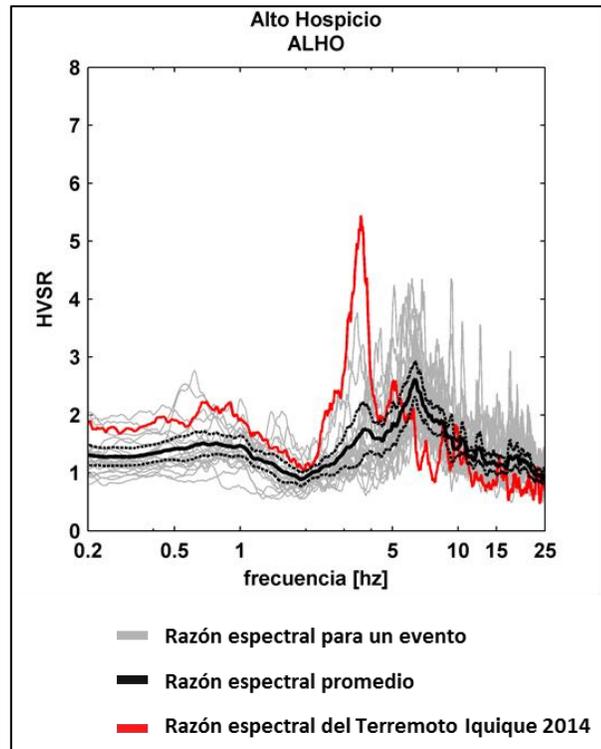


Figura 11: H/V para los registros de Alto Hospicio (ALHO).

4.3. Espectros de Respuesta

El espectro de respuesta corresponde a la máxima aceleración de respuesta (también se puede considerar velocidad o desplazamiento) de un sistema de un grado de libertad amortiguado. Para este caso se trabaja con un 5% de amortiguamiento crítico.

El espectro de respuesta asume un comportamiento elástico-lineal de la estructura en su comportamiento fuerza-desplazamiento. Una de las características del Espectro de Respuesta es que para periodos cercanos a 0 su valor es aproximadamente la aceleración máxima del suelo o peak ground acceleration (PGA).

A fin de conocer las respuestas en una determinada estación a través del espectro de respuesta, se procede como sigue:

1. Se normalizan los registros de aceleración de cada componente por su valor máximo.
2. Se calculan los espectros de respuesta para las aceleraciones normalizadas.
3. Se procede análogamente para todos los eventos de la misma estación.
4. Se combinan todos los aspectos normalizados mediante el promedio aritmético.

Este procedimiento permite obtener un espectro de respuesta promedio, cuyo valor a bajo periodo (o alta frecuencia) es aproximadamente 1. La Figura 12 muestra un ejemplo de los espectros de respuesta normalizados como función de la frecuencia (el inverso del periodo) para la estación Pica (PICA)

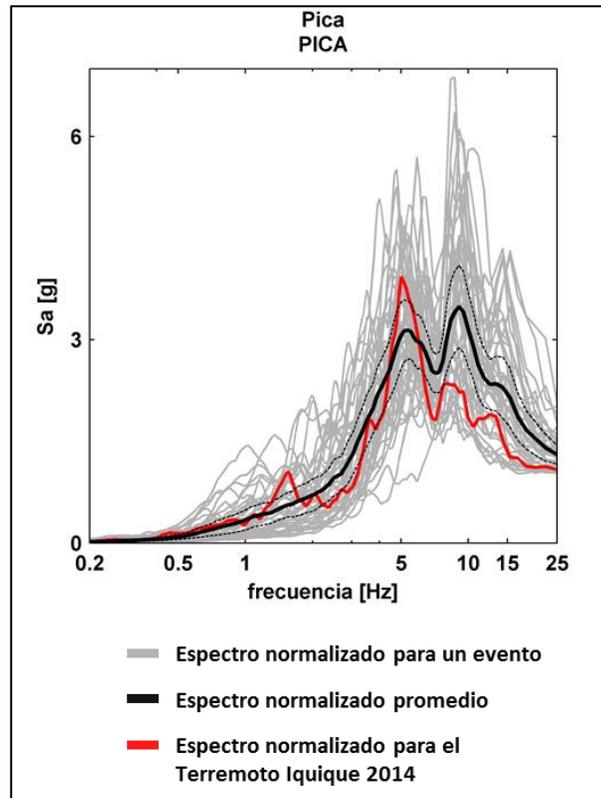


Figura 12: Espectros de respuesta normalizados para componente Norte-Sur de la estación Pica (PICA).

Con este espectro promedio y considerando un PGA para un evento cualquiera, se puede obtener la respuesta esperada de la estación ponderando el espectro promedio de respuesta por el PGA del evento. A través de este método, se puede determinar la frecuencia predominante en el caso de que se trate de suelo rígido y que dicha frecuencia sea alta.

5. Base de Datos

5.1. Estaciones Sismológicas

La Región de Tarapacá cuenta con un total de 35 estaciones sismológicas distribuidas según la Figura 13, considerando las estaciones de la Red Nacional de Acelerógrafos del Departamento de Ingeniería Civil (RENADIC), la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI) y el Centro Sismológico Nacional (CSN). La Figura 14, muestra en detalle las estaciones de Iquique y Alto Hospicio. Las características de las Estaciones, incluyendo posición, red, tipo de sensor y proveedor se muestran en la Tabla 2.



Figura 13: Estaciones sismológicas de la Región de Tarapacá (Google Earth)



Figura 14: Estaciones sismológicas de Iquique y Alto Hospicio (Google Earth)

Tabla 2: Características de las estaciones sismológicas de la Región de Tarapacá

Número	Estación	Ubicación	Latitud[°]	Longitud[°]	Red	Muestreo [Hz]	Tipo Sensor	Proveedor	Tipo de Suelo
1	ALHO	Alto Hospicio	-20.265	-70.101	RENADIC	100	QDR	Kinematics	Secuencias Basálticas y Andesíticas
2	CUYA *	Cuya	-19.16	-70.18	RENADIC	100	SMA-1 / QDR	Kinematics	Secuencias Volcánicas
3	FUBA	Fuerte Baquedano	-20.135	-69.755	RENADIC	100	QDR	Kinematics	Depósito Aluviales
4	GO01	Chusmiza	-19.669	-69.194	CSN	100	CMG5	Guralp	Complejos Volcánicos
5	HMBCX	Humberstone	-20.278	-69.888	CSN	100	CMG5	Guralp	Secuencias Sedimentarias
6	HUAR	Huara	-19.996	-69.767	RENADIC	200	SMA-1	Kinematics	Depósito Aluviales
7	IQEC	Iquique-Escuela	-20.252	-70.126	RENADIC	200	ETNA-1	Kinematics	Depósitos Eólicos
8	IQID *	Iquique-IDIEM	-20.22	-70.142	RENADIC	100	SMA/QDR	Kinematics	Formaciones Mesozoicas
9	IQPZ *	Iquique-Plaza Condell	-20.213	-70.149	RENADIC	200	SMA/QDR	Kinematics	Formaciones Mesozoicas
10	IQU	Iquique-Hospital	-20.214	-70.138	RENADIC	200	ETNA-1	Kinematics	Formaciones Mesozoicas
11	LOA	Aduana Río Loa	-21.425	-70.057	RENADIC	200	SMA-1	Kinematics	Depósito Aluviales
12	MNMCX	Miñita	-19.131	-69.596	CSN	100	CMG5	Guralp	Depósitos de remoción en masa

Número	Estación	Ubicación	Latitud[°]	Longitud[°]	Red	Muestreo [Hz]	Tipo Sensor	Proveedor	Tipo de Suelo
13	PATCX	Puerto Patache	-20.821	-70.153	CSN	100	CMG5	Guralp	Secuencias Volcánicas
14	PB01	Pampa del Tamarugal	-21.043	-69.487	CSN	100	EPI	Kinematics	Secuencias Sedimentarias
15	PB08	Quebrada de Chula	-20.141	-69.153	CSN	100	EPI	Kinematics	Secuencias Volcánico Sedimentarias
16	PB11	Quebrada Aricilda	-19.761	-69.656	CSN	100	EPI	Kinematics	Secuencias Sedimentarias
17	PICA	Pica	-20.492	-69.33	RENADIC	200	ETNA-1	Kinematics	Secuencias Piroclásticas
18	PISA	Pisagua	-19.595	-70.211	RENADIC	200	SMA-1	Kinematics	Secuencias Volcánicas
19	PPAT	Puerto Patache	-20.81	-70.2	RENADIC	200	CUSP	Canterbury	Batolitos
20	PSGCX	Pisagua	-19.599	-70.123	CSN	100	CMG5	Guralp	Secuencias Volcánicas
21	T01A	Cerro Dragón	-20.273	-70.122	ONEMI	200	Basalt	Kinematics	Depósitos Eólicos
22	T02A	Ruta A-16	-20.252	-70.118	ONEMI	200	Basalt	Kinematics	Depósitos Eólicos
23	T03A	Iquique-Regimiento Granaderos	-20.23	-70.146	ONEMI	200	Basalt	Kinematics	Depósitos Marinos
24	T04A	Iquique - Cruz Roja	-20.239	-70.133	ONEMI	200	Basalt	Kinematics	Formaciones Mesozoicas
25	T05A	Iquique-Serviu	-20.21	-70.15	ONEMI	200	Basalt	Kinematics	Formaciones Mesozoicas
26	T06A	Iquique-Hospital	-20.23	-70.146	ONEMI	200	Basalt	Kinematics	Formaciones Mesozoicas

Número	Estación	Ubicación	Latitud[°]	Longitud[°]	Red	Muestreo [Hz]	Tipo Sensor	Proveedor	Tipo de Suelo
27	T07A	Pozo Almonte -Comisaria	-20.256	-69.786	ONEMI	200	Basalt	Kinematics	Depósito Aluviales
28	T08A	Alto Hospicio-OS7	-20.27	-70.094	ONEMI	200	Basalt	Kinematics	Secuencias Basálticas y Andesíticas
29	T09A	Pisagua	-19.596	-70.211	ONEMI	200	Basalt	Kinematics	Secuencias Volcánicas
30	T10A	Huara-Tenencia	-19.995	-69.767	ONEMI	200	Basalt	Kinematics	Depósito Aluviales
31	T11A	Camiña	-19.312	-69.427	ONEMI	200	Basalt	Kinematics	Secuencias Sedimentarias
32	T12A	Mamiña	-20.071	-69.217	ONEMI	200	Basalt	Kinematics	Secuencias Volcánico Sedimentarias
33	T13A	Pica Tenencia	-20.497	-69.337	ONEMI	200	Basalt	Kinematics	Secuencias Piroclásticas
34	TA01	Aeropuerto Iquique	-20.566	-70.181	CSN	100	CMG5	Guralp	Secuencias Volcánicas
35	TA02	Iquique-Cavanca	-20.27	-70.131	CSN	100	CMG5	Guralp	Depósitos Marinos

(*): Durante el año 2011, se cambiaron estos sensores de SMA a QDR.

Cabe mencionar que en las estaciones del Centro Sismológico Nacional también se tienen instalados sismógrafos de Banda Ancha modelo STS-2, del proveedor Streckeisen. La Figura 15 muestra algunos de los modelos de acelerógrafos y sismógrafos.

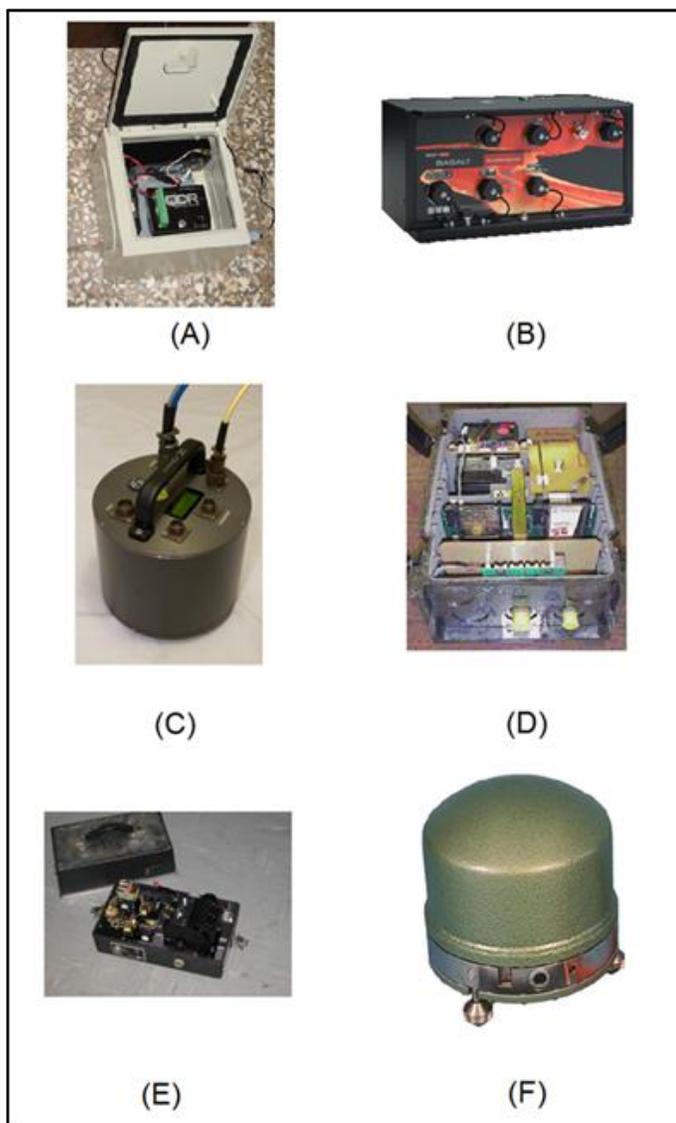


Figura 15: Modelos de los Acelerógrafos. QDR (A), Basalt (B), CMG-5 (C), ETNA (D), SMA-1 (E). Sismógrafo STS-2 (F).

Además de los registros de aceleración de eventos sísmicos, se tienen en algunas estaciones otros datos que permiten determinar la respuesta de las estaciones. Entre estos datos se cuenta ruido ambiental medido ya sea con Sismógrafos de Banda Ancha (BB), acelerógrafos (RA) y campañas de mediciones de ruido ambiental con sismógrafos Kinometrics Rangers uniaxiales (SS). Además, en las inmediaciones de algunas estaciones se tiene descripción de sondajes provenientes de otros estudios y resultados de métodos de ondas superficiales (SPAC, FK). Toda la información disponible en cada estación se resume en la Tabla 3.

Tabla 3: Disponibilidad de datos en las estaciones sismológicas.

Número	Estación	Ubicación	H/V	H/V Montalva 2014	Sondaje	SPAC/FK
1	ALHO	Alto Hospicio	Ev			
2	CUYA	Cuya	Ev			
3	FUBA	Fuerte Baquedano	Ev			
4	GO01	Chusmiza	Ev			
5	HMBCX	Humberstone	Ev/BB/RA			Si
6	HUAR	Huara	Ev			
7	IQEC	Iquique-Escuela	Ev/SS			
8	IQID	Iquique-IDIEM	Ev/SS		Si	
9	IQPZ	Iquique-Plaza Condell	Ev			
10	IQU	Iquique-Hospital	Ev/SS		Si	
11	LOA	Aduana Río Loa	Ev			
12	MNMCX	Miñita	Ev/BB/RA			
13	PATCX	Puerto Patache	Ev/BB/RA			
14	PB01	Pampa del Tamarugal	Ev/BB/RA			
15	PB08	Quebrada de Chula	Ev/BB/RA			
16	PB11	Quebrada Aricilda	Ev/BB/RA			
17	PICA	Pica	Ev			
18	PISA	Pisagua	Ev			
19	PPAT	Puerto Patache	Ev			
20	PSGCX	Pisagua	Ev/BB/RA		Si	
21	T01A	Cerro Dragón	Ev/RA		Si	Si
22	T02A	Ruta A-16	Ev/RA	Si	Si	
23	T03A	Iquique-Regimiento Granaderos	Ev/RA			
24	T04A	Iquique - Cruz Roja	Ev/RA			Si
25	T05A	Iquique-Serviu	Ev/RA	Si		Si
26	T06A	Iquique-Hospital	Ev/RA	Si	Si	
27	T07A	Pozo Almonte -Comisaria	Ev/RA	Si		Si
28	T08A	Alto Hospicio-OS7	Ev/RA			Si
29	T09A	Pisagua	Ev/RA	Si		
30	T10A	Huara-Tenencia	Ev/RA			Si
31	T11A	Camiña	Ev/RA			
32	T12A	Mamiña	Ev/RA			
33	T13A	Pica Tenencia	Ev/RA			Si
34	TA01	Aeropuerto Iquique	Ev/BB/RA			
35	TA02	Iquique-Cavanca	Ev/BB/RA			

Nota: En la columna H/V, Ev, significa eventos sísmicos, BB, mediciones de sismógrafos de banda ancha, RA, ruido de aceleración y SS datos provenientes de campañas realizadas con sismógrafos uniaxiales Kinematics Rangers.

5.2. Eventos Sísmicos

Los eventos sísmicos que se consideran para este estudio, corresponden a eventos registrados en las estaciones de la Región de Tarapacá con una magnitud de momento igual o mayor que 5.0. En total se tienen 73 eventos entre los cuales destacan el Terremoto de Tarapacá de 2005, el Terremoto de Tocopilla 2007 y el Terremoto de Iquique 2014, incluyendo sus réplicas. El primer registro data de marzo de 2002 y el último de finales de agosto de 2014, su distribución de acuerdo a la magnitud se muestra en la Figura 16. La Tabla 4 presenta el detalle de los eventos sísmicos analizados. Los hipocentros de estos eventos en planta y profundidad se muestran en la Figura 17.

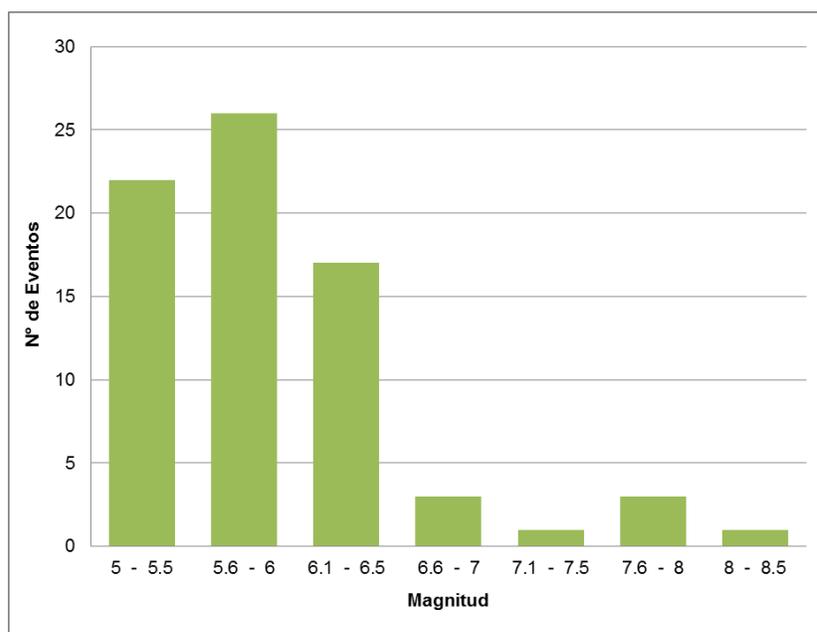


Figura 16: Histograma de ocurrencia según magnitud.

Tabla 4: Eventos Sísmicos.

Sismo			Posición (USGS)			N° de Estaciones con registros
Fecha	Hora (UTC)	Magnitud	Latitud	Longitud	Profundidad[km]	
28-03-2002	4:56:00	6.5	-21.663	-68.329	125.1	1
12-11-2002	13:06:00	5.2	-20.155	-68.757	109.9	1
25-08-2004	5:12:00	5.1	-20.353	-68.93	93	1
19-03-2005	1:35:00	5.3	-20.415	-68.626	109.2	1
25-03-2005	3:54:00	5.1	-20.29	-68.937	96.1	1
13-06-2005	22:44:00	7.8	-19.592	-69.12	108	7
14-08-2005	2:39:00	5.8	-19.78	-68.98	113.8	1
27-03-2006	5:23:00	5.2	-20.799	-69.469	57.9	1
09-04-2006	20:50:00	5.7	-20.45	-70.244	34.6	2
25-10-2007	8:35:00	5.6	-20.602	-68.754	100	1
14-11-2007	15:40:00	7.7	-22.247	-69.89	40	10
16-12-2007	8:09:00	6.7	-22.954	-70.182	45	1
04-02-2008	17:01:00	6.3	-20.166	-70.037	35	4
01-03-2008	19:51:00	5.6	-20.256	-69.941	36.6	4
24-03-2008	20:39:00	6.2	-20.043	-68.963	120	3
11-02-2009	20:45:00	5.3	-20.249	-68.794	109	1
17-04-2009	2:08:00	6.1	-19.584	-70.483	25	1
15-07-2009	15:21:00	5.2	-20.353	-68.927	112.1	1
13-11-2009	3:05:00	6.5	-19.394	-70.321	27	6
06-05-2010	2:42:00	6.2	-18.058	-70.547	37	1
26-06-2010	19:01:00	5.5	-18.927	-69.164	104.4	2
06-07-2010	13:54:00	6.3	-35.619	-71.953	47.2	1
22-10-2010	19:31:00	5.8	-20.878	-68.372	132.2	4
14-02-2011	21:56:00	5.2	-19.967	-68.834	105.9	4
28-02-2011	20:45:00	5.2	-20.387	-68.898	104	6
06-03-2011	12:31:00	6.3	-18.021	-69.362	118	3
02-04-2011	10:59:00	5.9	-19.543	-69.014	110	5
20-06-2011	16:35:00	6.4	-21.701	-68.228	128	6
15-07-2011	14:55:00	5.4	-21.173	-68.775	125.1	1
25-03-2012	22:37:00	7.1	-35.2	-72.217	40.7	1
14-05-2012	10:00:00	6.2	-17.678	-69.591	105.9	4
21-09-2012	12:17:00	5.4	-19.569	-68.961	106	2
13-01-2013	21:23:00	5.3	-20.058	-69.049	75.3	7
10-07-2013	14:32:00	5.6	-19.302	-69.248	110	8
23-08-2013	8:34:00	5.8	-22.274	-68.592	111	2
04-01-2014	0:11:00	5.7	-20.687	-70.795	26.1	2
07-01-2014	3:43:00	5.3	-20.989	-69.729	97.3	9

29-01-2014	10:01:00	5.6	-18.508	-69.373	120.03	1
16-03-2014	21:16:00	6.7	-19.98	-70.702	20	20
17-03-2014	5:11:00	6.4	-20.016	-70.883	21	12
18-03-2014	21:26:00	5.8	-19.926	-70.796	33.2	6
22-03-2014	12:59:00	6.2	-19.762	-70.874	20	10
23-03-2014	18:20:00	6.3	-19.689	-70.853	21	18
24-03-2014	11:26:00	5.7	-19.823	-70.765	22	5
24-03-2014	15:45:00	5.7	-19.593	-70.82	17.05	4
24-03-2014	11:40:00	5.6	-19.828	-70.882	15.19	3
31-03-2014	12:53:00	5.6	-19.511	-69.174	114.5	10
01-04-2014	23:46:00	8.2	-19.609	-70.769	25	26
01-04-2014	23:57:00	6.9	-19.892	-70.945	28.42	8
02-04-2014	4:46:00	5.5	-20.075	-70.832	16.53	10
03-04-2014	2:43:00	7.7	-20.57	-70.493	22.4	23
03-04-2014	1:58:00	6.5	-20.311	-70.575	24.07	18
03-04-2014	5:26:00	6.4	-20.796	-70.586	25	19
04-04-2014	1:37:00	6.3	-20.642	-70.654	13.71	17
07-04-2014	13:43:00	5.7	-20.127	-70.851	38	17
08-04-2014	10:14:00	5.6	-20.512	-70.922	6	12
11-04-2014	0:01:00	6.2	-20.659	-70.647	13.77	23
13-04-2014	12:11:00	5.5	-20.566	-70.747	13.37	17
19-04-2014	20:54:00	5.8	-20.028	-70.919	10	14
14-05-2014	3:38:00	5.6	-22.723	-66.44	213.12	10
16-05-2014	17:08:00	5.5	-23.445	-68.538	104.95	8
17-05-2014	9:11:00	5.6	-19.987	-70.896	5.62	20
30-05-2014	15:32:00	5.6	-21.302	-69.999	59.6	22
30-05-2014	11:41:00	5.2	-21.309	-69.974	67.8	19
19-06-2014	19:54:00	5.8	-19.841	-70.87	10.6	17
19-06-2014	9:38:00	5.7	-19.974	-70.945	11.3	20
20-06-2014	20:22:00	5.8	-19.81	-71.003	12.25	16
20-06-2014	19:53:00	5.6	-19.802	-70.922	12.75	18
13-07-2014	20:54:00	5.5	-20.258	-70.347	33.12	5
13-07-2014	7:18:00	5.3	-30.748	-70.62	83.4	8
14-07-2014	11:24:00	5.5	-17.858	-73.429	10	8
23-07-2014	21:39:00	5.5	-20.226	-68.677	118.73	18
23-08-2014	4:45:00	5.7	-20.174	-69.038	100	4

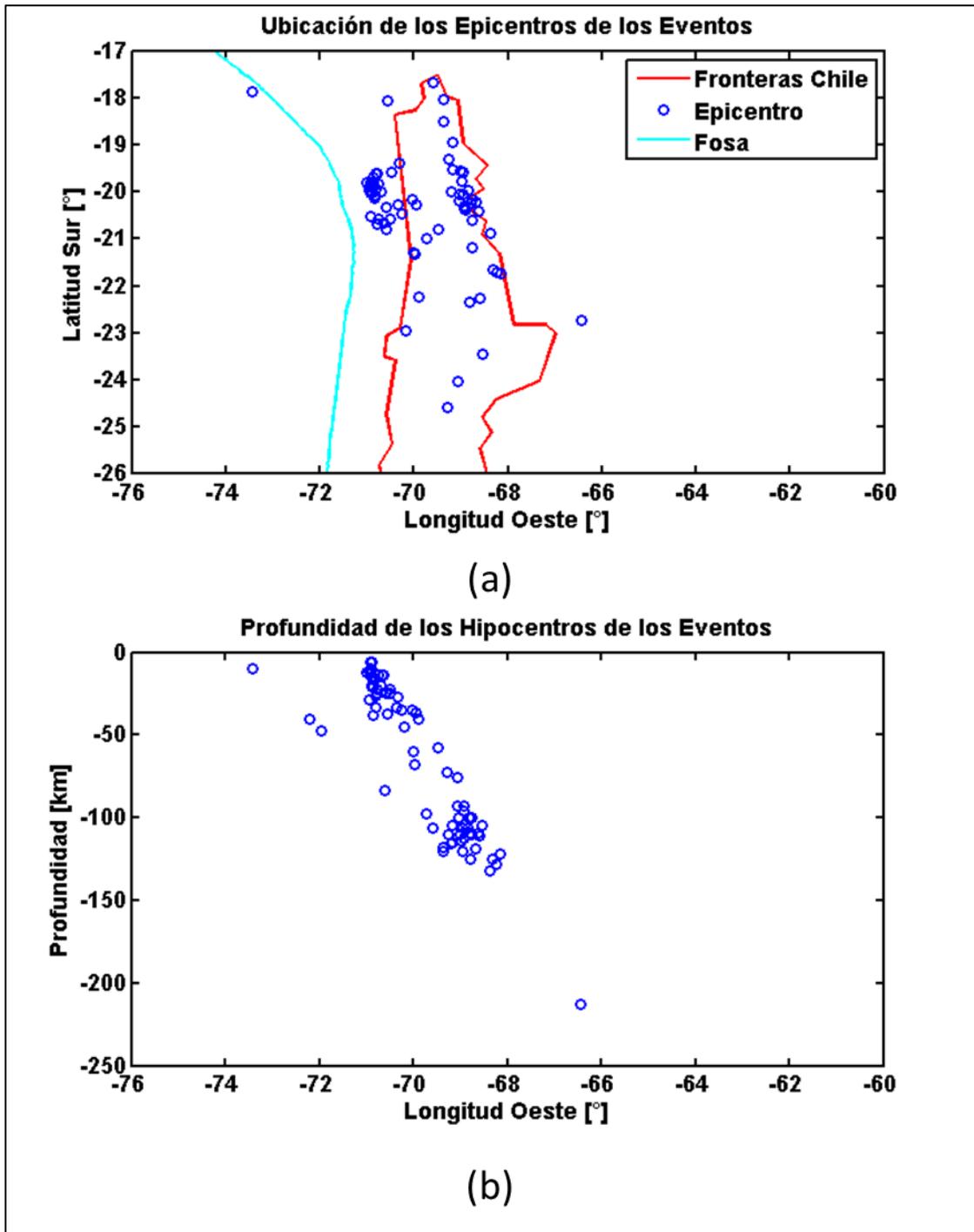


Figura 17: Eventos sísmicos analizados en este trabajo. Ubicación de los hipocentros en (a) planta y (b) profundidad en corte EW (USGS)

6. Resultados

6.1. Razones Espectrales

6.1.1. Razones Espectrales de Vibraciones Ambientales

En todas las estaciones de la Región de Tarapacá se cuenta con registros de eventos sísmicos y en muchas de ellas se cuenta también con registros de vibraciones ambientales (Tabla 3). En las estaciones del Centro Sismológico Nacional (CSN) se tienen registros de vibraciones ambientales provenientes tanto de sismógrafo de banda ancha como de acelerógrafos. Por otro lado, en las estaciones de la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI), se cuenta sólo con registros de ruido de aceleración. Finalmente, en algunas estaciones de la Red Nacional de Acelerógrafos del Departamento de Ingeniería Civil (RENADIC), ubicadas en la ciudad de Iquique, se cuenta con mediciones de vibraciones ambientales post terremoto.

Para las estaciones del CSN y la ONEMI, se analizaron 7 registros de 1 día de duración. A cada una de estas señales se le aplica el procedimiento de cálculo mostrado en la Sección 4.1., con los parámetros de análisis tipo 1 de la Tabla 5, es decir, con un largo de ventana de 60 segundos, con una ventana móvil de 1 segundo y permitiendo que el promedio la razón entre el promedio de ambas se encuentre acotado entre 2 y 0.5. En el caso que la calidad de la señal no permita la selección de un número apropiado de ventanas, se relajan los parámetros a los del análisis tipo 2, con un largo de ventana de 60 segundos, una ventana móvil de 1 segundo y acotando la razón entre los promedios de ambos por 2.5 y 0.2.

Debido a que en la campaña de mediciones de RANADIC se tienen registros más cortos de 30 minutos, se procede con un largo de ventana de 20 segundos a fin de seleccionar un mayor número de ventanas, acorde a los parámetros de análisis tipo 3 de la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de Análisis.

	Tipo de análisis		
	1	2	3
Largo de la Ventana [s]	60	60	20
Largo de la Ventana Móvil [s]	1	1	1
S_{max}	2	2.5	2
S_{min}	0.5	0.2	0.5

El tipo de análisis y el número de ventanas seleccionadas queda detallado en la Tabla 6 y los resultados de aplicar el método de las razones espectrales H/V se muestran en la Figura 18.

Tabla 6. Tipo de Análisis y Ventanas Seleccionadas por Estación.

Estación	Red	Tipo de Análisis	Ventanas Seleccionadas
TA01	CSN	1	454
TA02	CSN	1	1102
HMBCX	CSN	2	583
MNMCX	CSN	1	800
PATCX	CSN	2	19
PB01	CSN	2	43
PB08	CSN	1	1433
PB11	CSN	2	35
PSGCX	CSN	1	1036
IQID	RENADIC	3	66
IQEC	RENADIC	3	55
IQU	RENADIC	3	54
T01A	ONEMI	1	1367
T02A	ONEMI	1	1348
T03A	ONEMI	1	686
T04A	ONEMI	2	516
T05A	ONEMI	2	484
T06A	ONEMI	1	1268
T07A	ONEMI	2	299
T08A	ONEMI	2	974
T09A	ONEMI	1	400
T10A	ONEMI	1	270
T11A	ONEMI	1	581
T12A	ONEMI	1	307
T13A	ONEMI	1	1439

Como ya se mencionó, en las estaciones del Centro Sismológico Nacional, se tienen mediciones de vibraciones ambientales provenientes de sismógrafos de banda ancha y de acelerógrafos. La Figura 19 muestra la comparación de resultados entre ambos instrumentos. A partir de estos resultados, se desestima el uso de vibraciones ambientales registradas por acelerógrafos, ya que la baja ganancia de estos instrumentos impide medir vibraciones del suelo y, por lo tanto, las razones espectrales son planas.

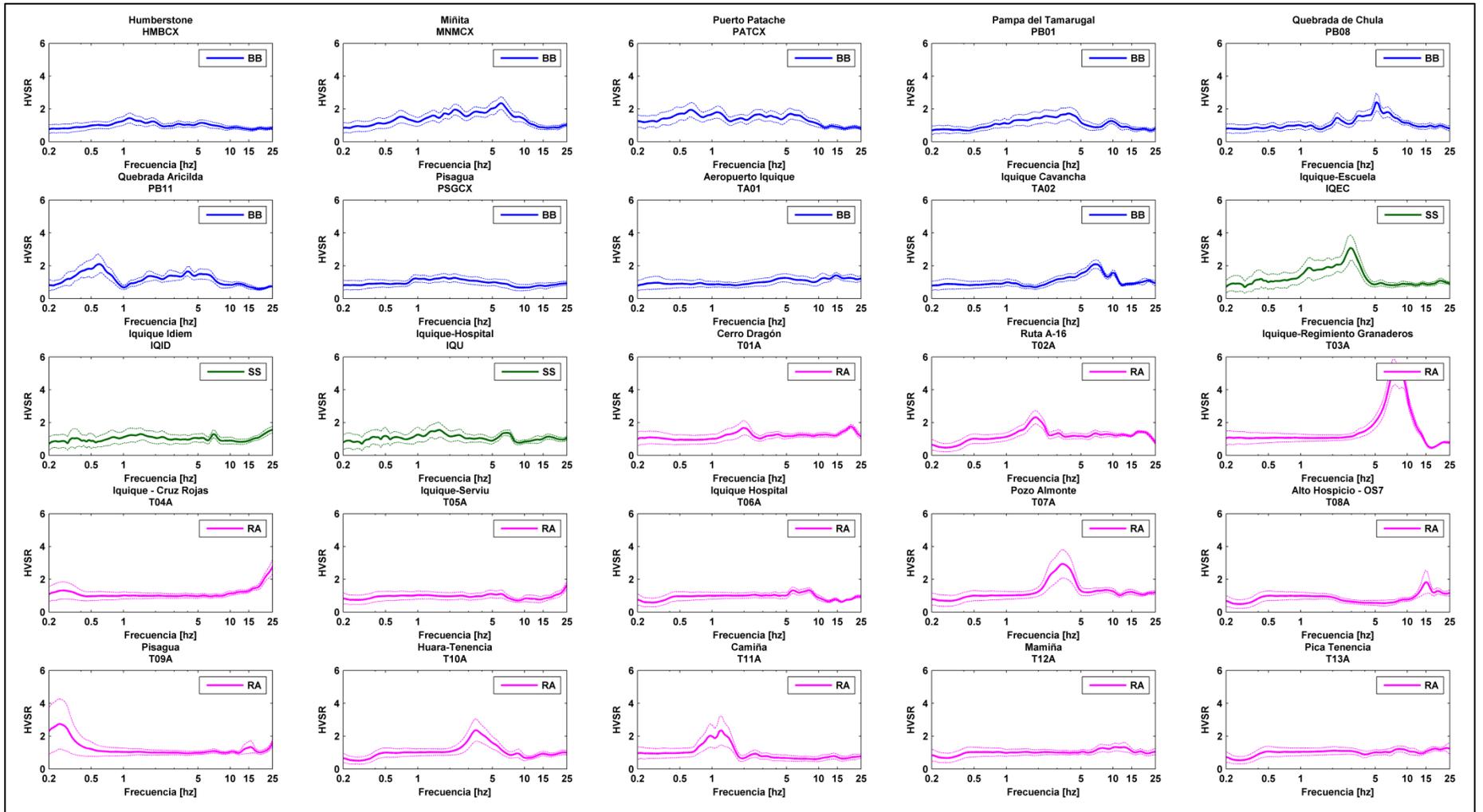


Figura 18. Resultados de las razones espectrales de vibraciones ambientales. En azul se muestran las razones espectrales de sismógrafos de banda ancha, en magenta las de ruido de acelerógrafos, y en verde las de sismógrafos uniaxiales Rangiers de Kinemetrics.

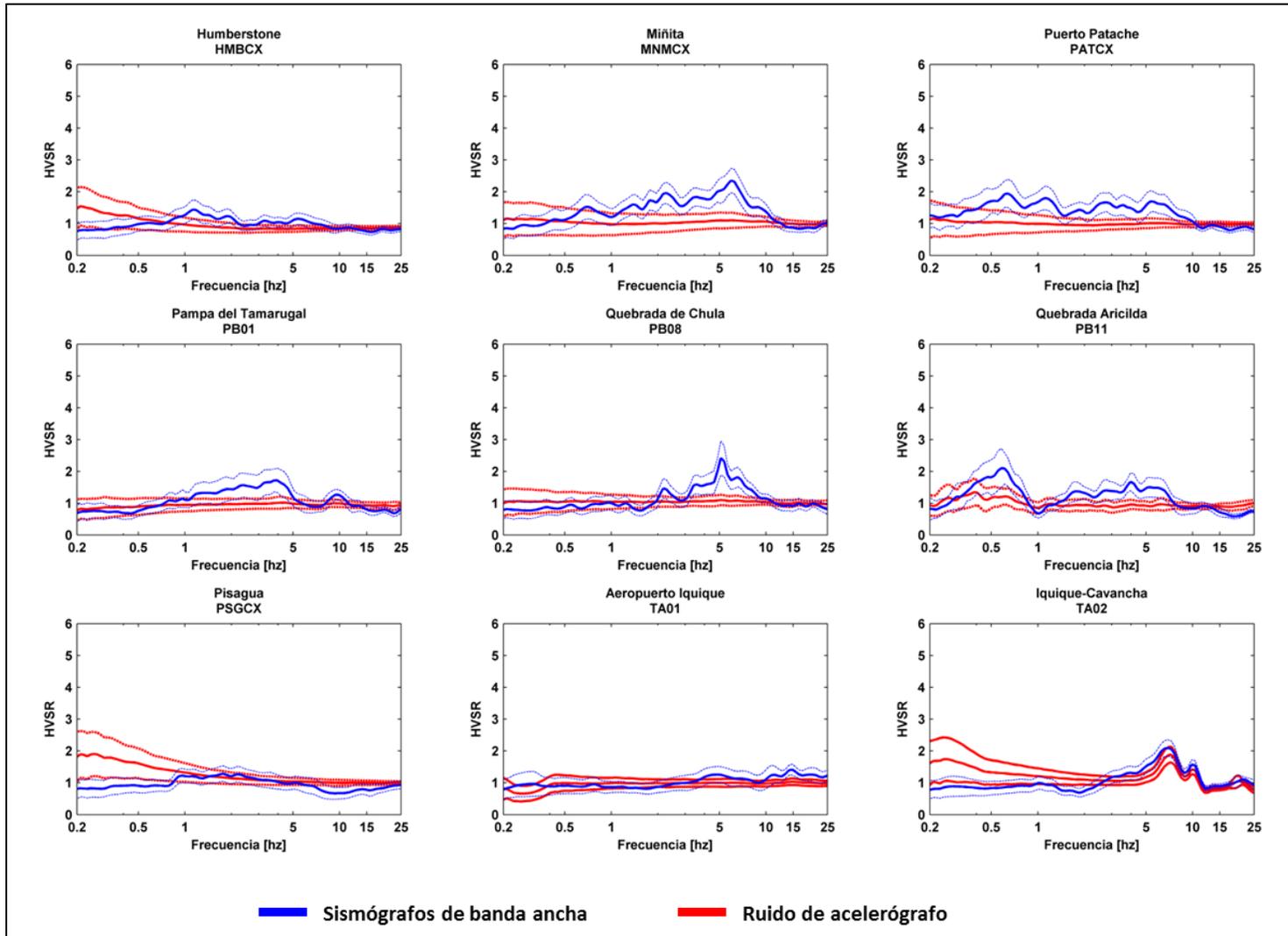


Figura 19. Razones espectrales de vibraciones ambientales medidas con sismógrafos de banda ancha y acelerógrafos en las estaciones del Centro Sismológico Nacional (CSN).

6.1.2. Razones Espectrales de Registros de Eventos Sísmicos

Para la aplicación del método de las razones espectrales H/V a eventos sísmicos, se procede acorde a lo explicado en la Sección 4.2. En primer lugar, dado que los eventos que registra una estación poseen diferente largo, se busca el evento con el registro de mayor extensión y se completan con ceros los demás registros. Esto produce que todos los registros de eventos y sus transformadas de Fourier sean del mismo largo. Luego, se fija el suavizado de la transformada rápida de Fourier con una media móvil de 0,25 Hz de vecindario.

Debido a que las transformadas de Fourier poseen el mismo largo para todos los eventos de una misma estación, resulta trivial combinar las razones espectrales. Tanto las razones espectrales para cada evento como su promedio y desviación estándar en cada estación se muestran en la Figura 20.

Agrupando los resultados de la Figura 19 y la Figura 20, se pueden comparar las razones espectrales de vibraciones ambientales y de registros de eventos sísmicos. La comparación se muestra en la Figura 21.

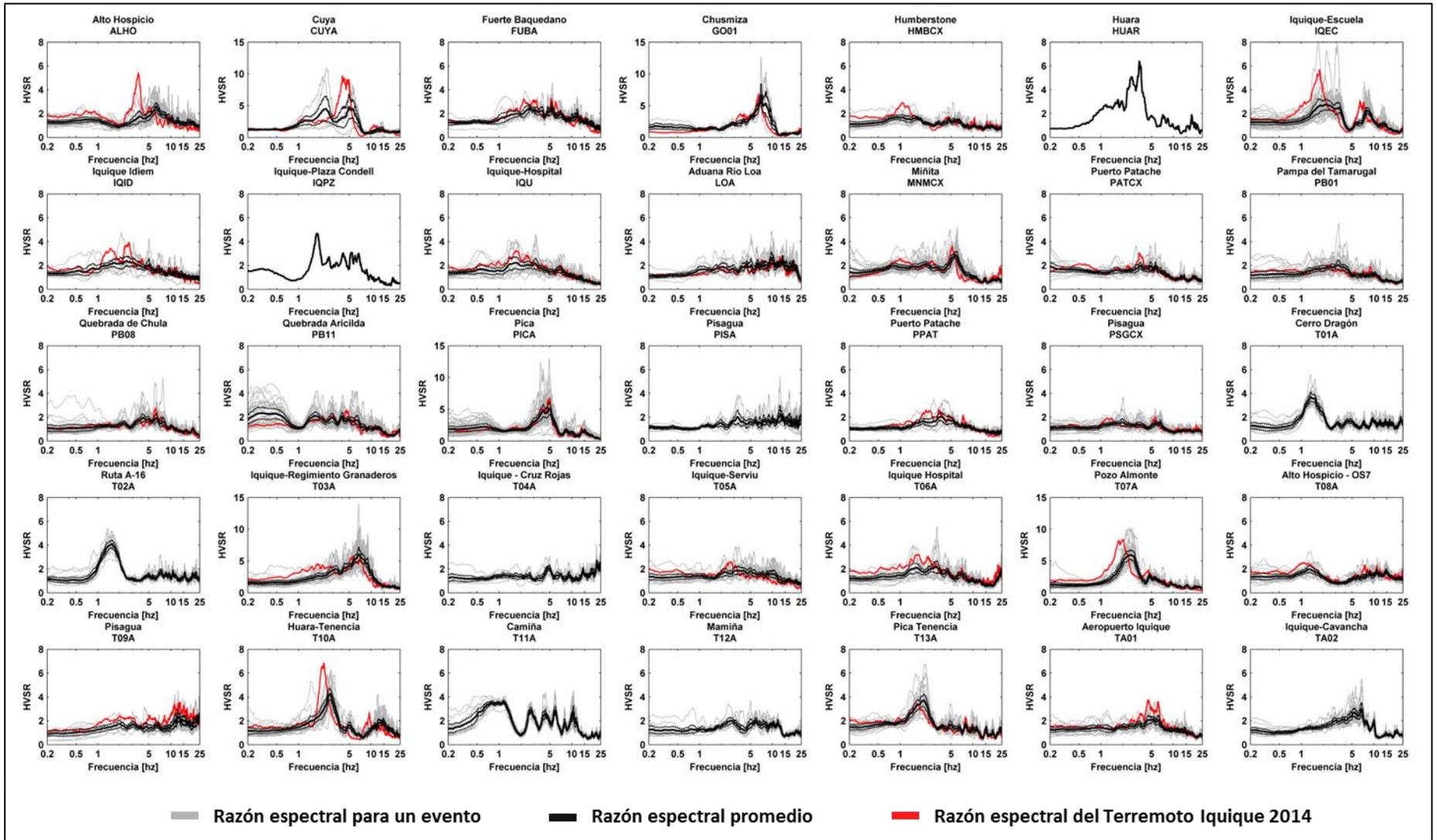


Figura 20. Resultados de las razones espectrales de eventos sísmicos.

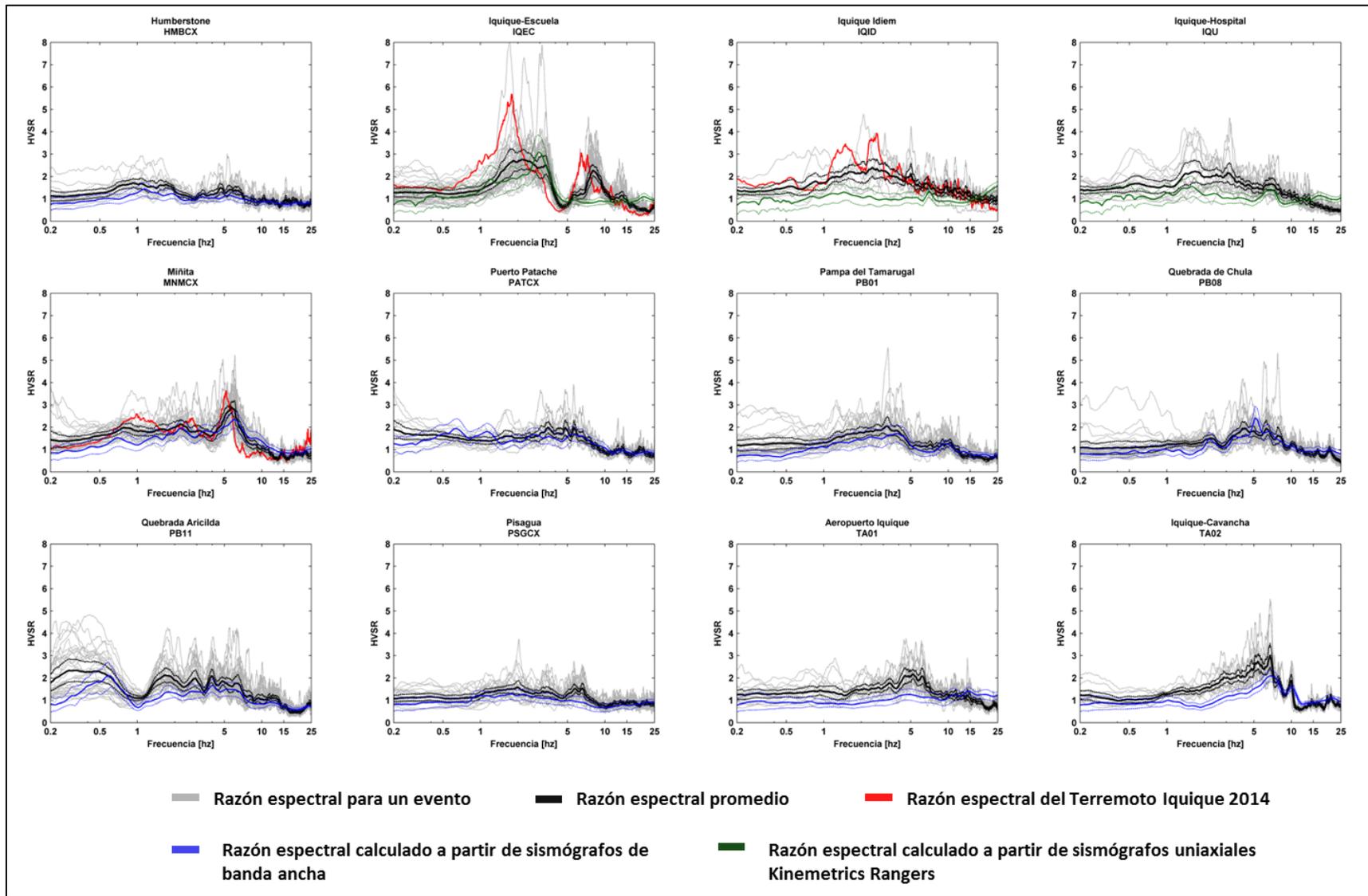


Figura 21. Comparación del método de las razones espectrales H/V de vibraciones ambientales y de eventos sísmicos.

6.2. Espectros de Respuesta en las Estaciones

A fin de conocer la respuesta esperada para las estaciones, se procede a obtener el espectro de respuesta normalizado promedio. Para lo anterior, se procede acorde a lo explicado en la Sección 4.3. El cálculo de cada espectro se realiza con un 5% del amortiguamiento crítico, y cada componente se normaliza por su aceleración máxima. Finalmente, en cada una de las tres componentes, se promedian los espectros y se calcula la desviación estándar. Los resultados para las componentes norte-sur, este-oeste y vertical se muestran en las Figuras 22, 23 y 24, respectivamente.

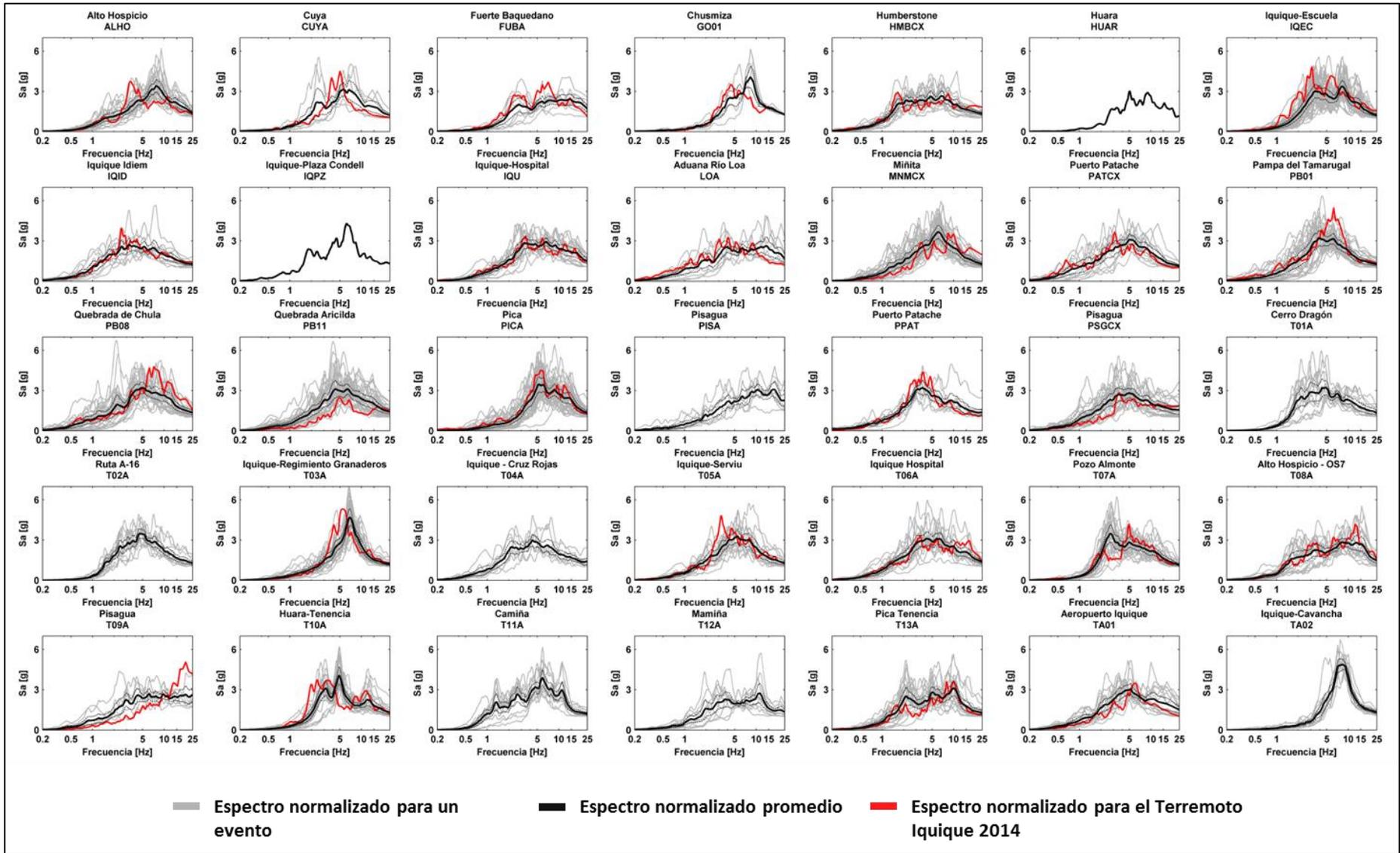


Figura 22. Espectros de respuesta normalizados para las estaciones de la Región de Tarapacá, componente Norte Sur.

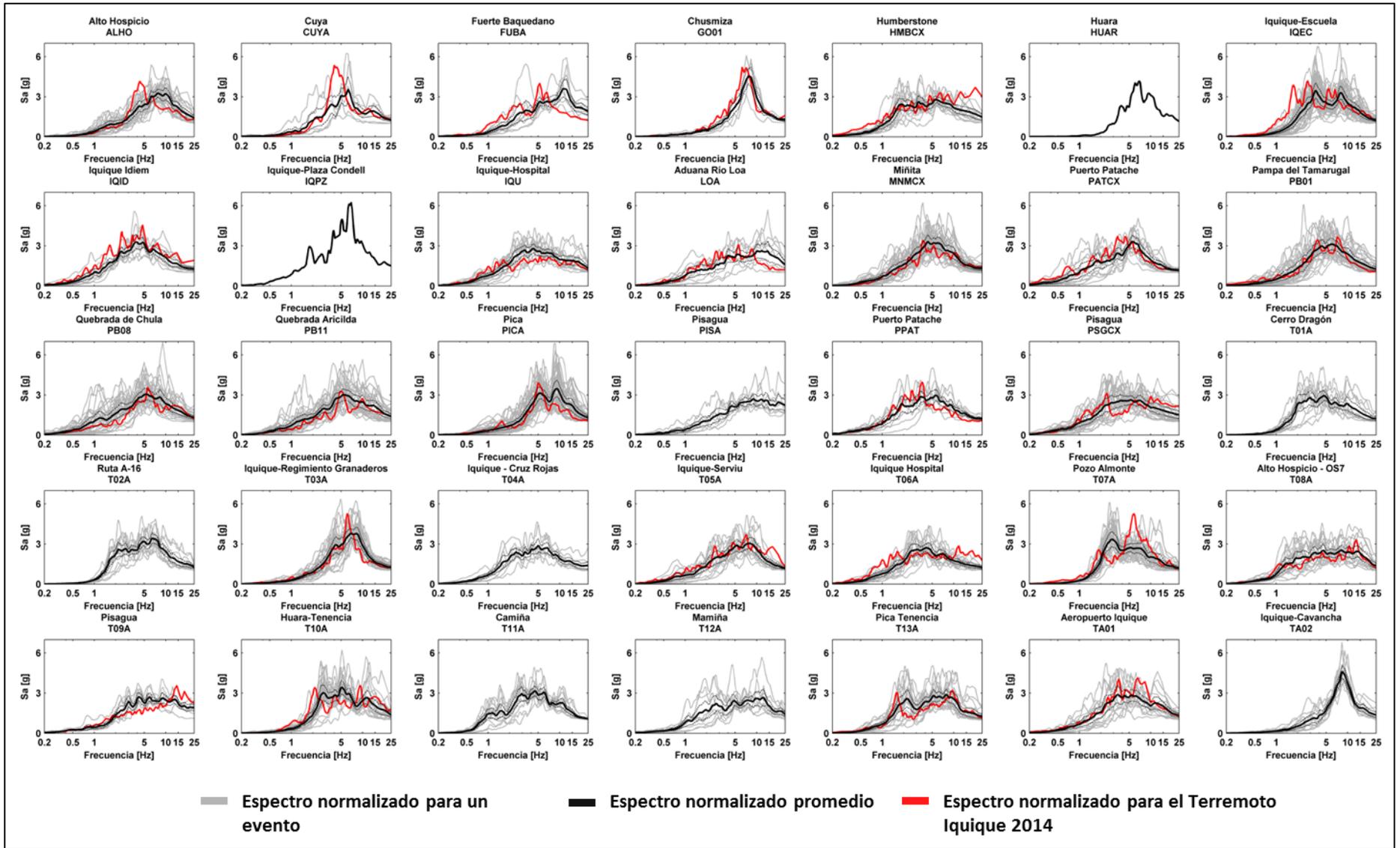


Figura 23. Espectros de respuesta normalizados para las estaciones de la Región de Tarapacá, componente Este-Oeste.

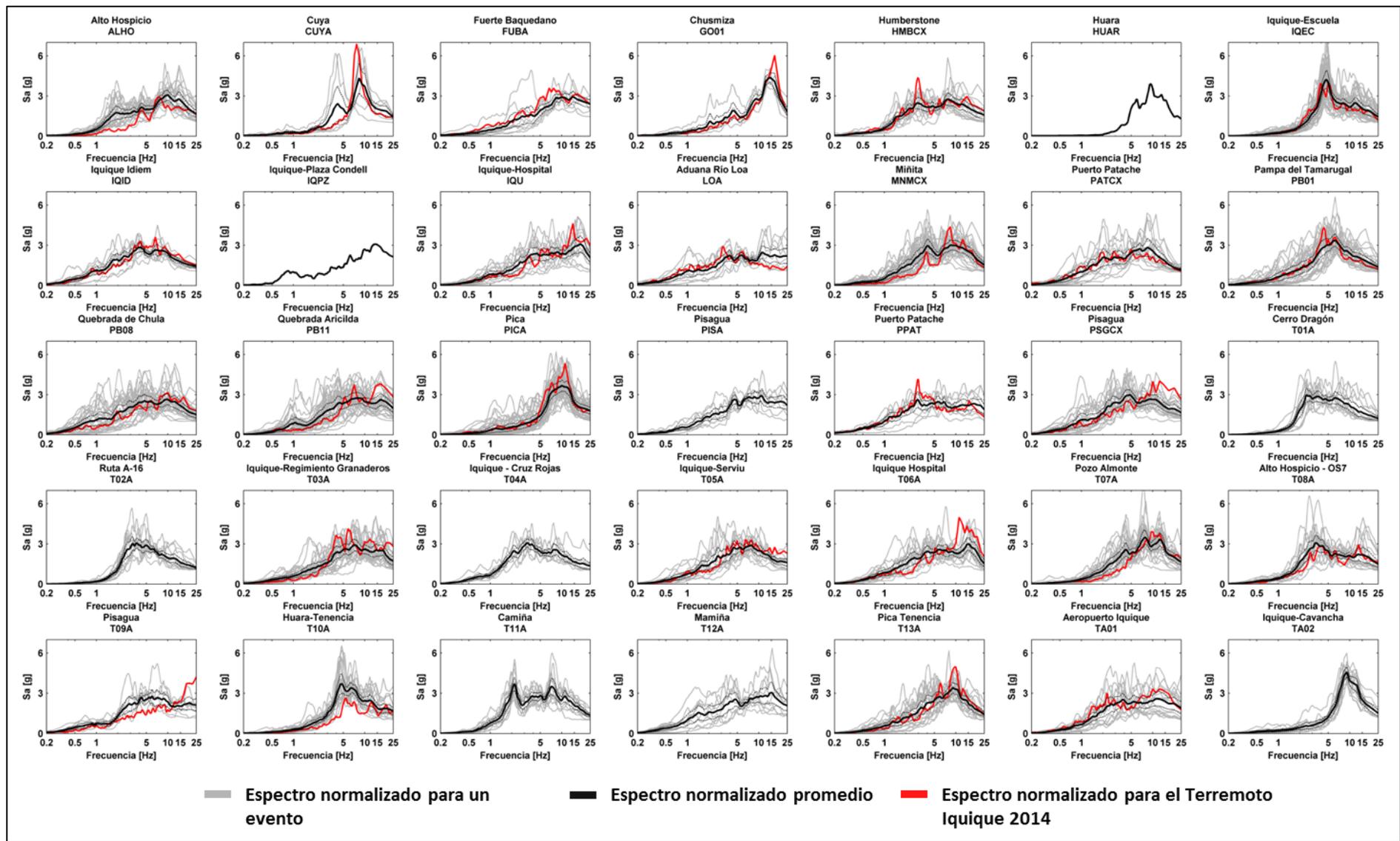


Figura 24. Espectros de respuesta normalizados para las estaciones de la Región de Tarapacá, componente vertical.

6.3 Espectros de respuesta normalizados por espectro de referencia en la ciudad de Iquique

Para el cálculo teórico de la función de transferencia de un depósito de suelo, es necesario tener el registro de un evento sísmico tanto en la superficie del depósito de suelo como en un afloramiento rocoso. Una de las metodologías para estimar la función de transferencia de manera empírica utiliza la razón entre el espectro de respuesta del registro en la superficie del suelo y el espectro de respuesta en la superficie de un afloramiento rocoso.

Para lo anterior es necesario tener estaciones emplazadas sobre roca y suelo, con eventos registrados en común entre las estaciones y que estas se encuentren relativamente cerca a fin de que la atenuación producto de la distancia hipocentral sea despreciable. Teniendo en cuenta esto, solo en la ciudad de Iquique se tiene la suficiente densidad de estaciones con estos requerimientos.

La estación Iquique Hospital (T06A) se escoge como estación de referencia, ya que los sondeos reportados por Becerra (2014) (ver Figura 27) indican que se trataría de un afloramiento rocoso. Además, el método de las razones espectrales H/V en esta estación resulta en una respuesta plana. Finalmente, esta estación posee una gran cantidad de eventos en común con las otras estaciones emplazadas en suelo (ver Tabla 7).

Para calcular los espectros de respuesta normalizados por el espectro de referencia de Iquique Hospital (T06A), se procede de la siguiente forma. Para cada estación ubicada en suelo:

1. Se consideran eventos en común que tenga con la estación de referencia T06A.
2. Se calculan los espectros de respuesta de las componentes horizontales para ambas estaciones.
3. Se dividen los espectros de la estación ubicada en suelo con los espectros de respuesta del mismo evento para la estación de referencia T06A.
4. Se promedian los resultados del paso 3 para todos los eventos que se tengan en común entre la estación y la estación de referencia T06A.

Las estaciones consideradas en suelo y la distancia a la estación de referencia Iquique Hospital (T06A) se muestran en la Tabla 7. Los resultados del análisis se muestran en la Figura 25.

Tabla 7. Estaciones en suelo de Iquique.

Estación	Lugar	Distancia a T06A [m]
IQEC	Iquique - Escuela Chipana	4350
T01A	Cerro Dragón	6688
T02A	Ruta A16	4709
T03A	Iquique - Regimiento Granaderos	1863
TA02	Iquique - Cavanca	6174

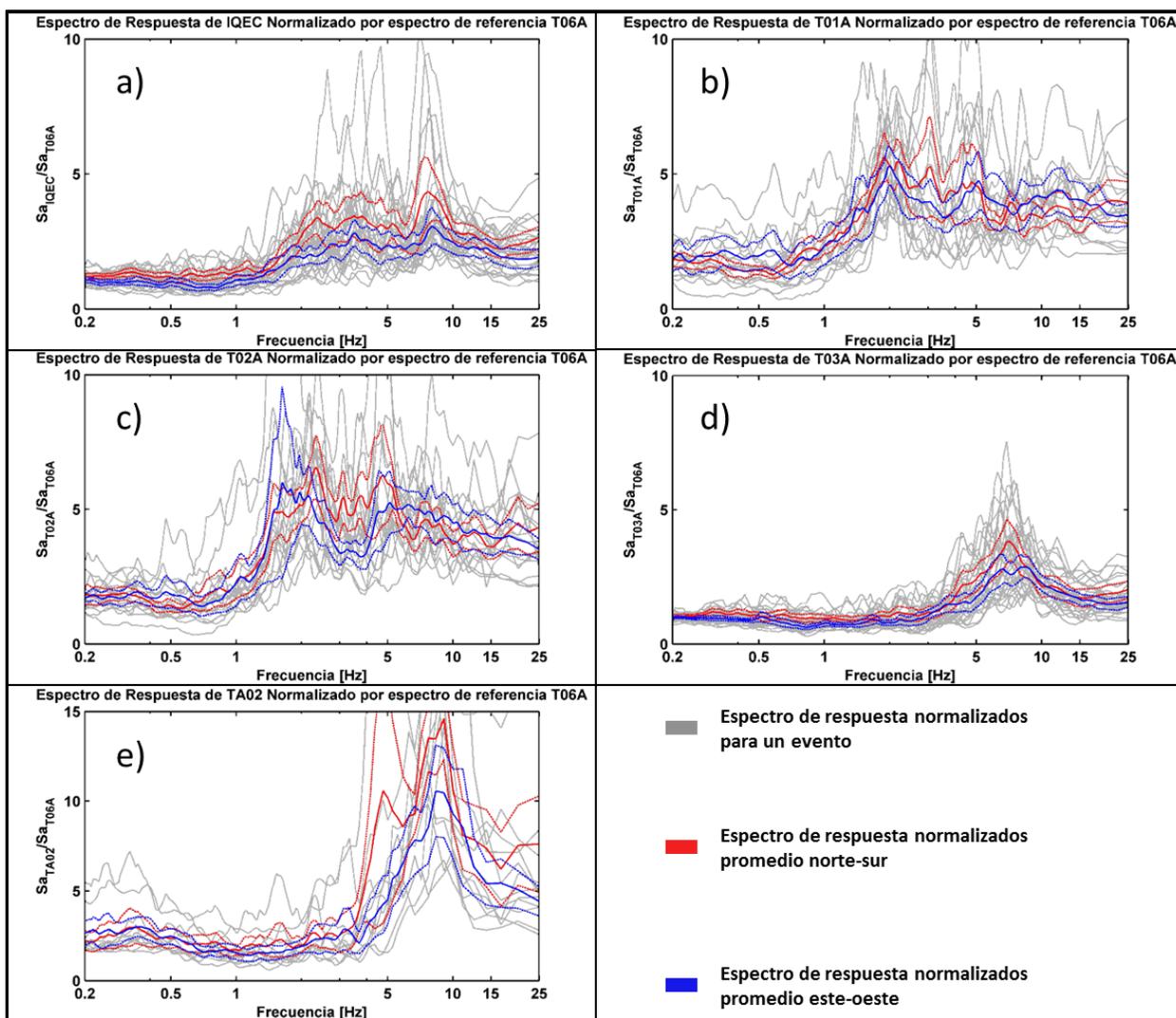


Figura 25. Espectros de respuesta normalizados con respecto a Iquique Hospital (T06A) para (a) Iquique Escuela (IQEC), (b) Iquique Cerro Dragón (T01A), (c) Iquique Ruta A16 (T02A), (d) Iquique Regimiento Granaderos (T03A) y (e) Iquique Cavancha (TA02).

Luego, estas curvas de espectros normalizados por una estación de referencia se pueden estimar como una aproximación de la función de transferencia para dichas estaciones, obteniendo las frecuencias predominantes para luego contrastarlas con las obtenidas mediante otros métodos.

7. Discusión

7.1. Atenuación de Aceleración en el Terremoto de Iquique 2014

Las aceleraciones máximas registradas en las componentes norte-sur y este-oeste como función de la distancia hipocentral se muestran en la Figura 26. En esta se puede identificar las estaciones que podrían presentar efecto de sitio ya sea por efectos topográficos o bien por las características geotécnicas de los suelos. Se incluye a modo de referencia la curva de atenuación para eventos tipo interplaca válida para aceleraciones horizontales sobre roca o suelo, propuesta por Ruiz y Saragoni (2005).

$$a_H[\text{cm/seg}^2] = \frac{4 \cdot e^{1.3M_w}}{(R + 30)^{1.43}} \quad (12)$$

Donde R corresponde a la distancia hipocentral y M_w corresponde a la magnitud de momento del Terremoto.

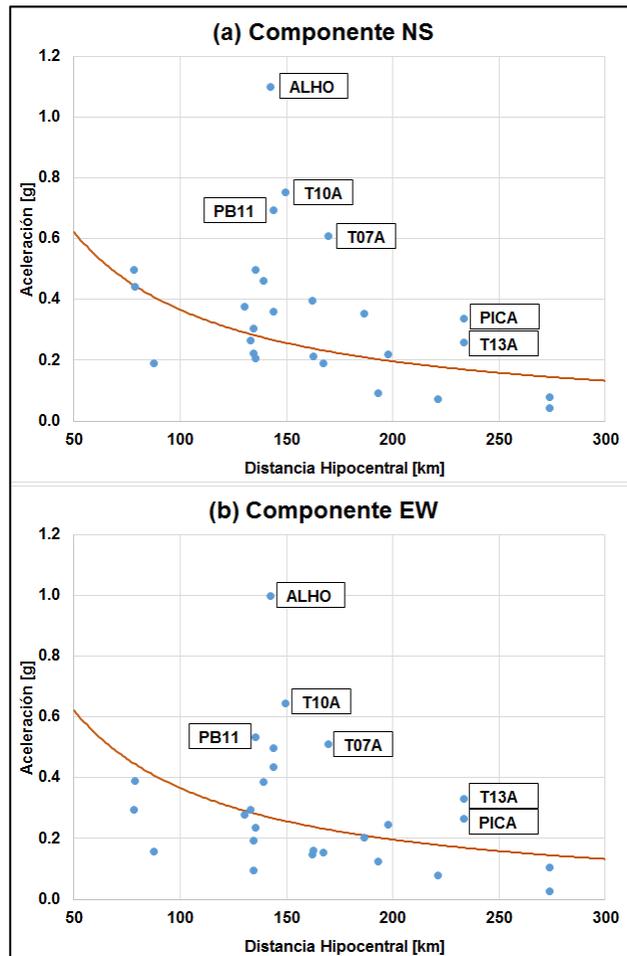


Figura 26. Atenuación de aceleraciones máximas para el Terremoto de 2014 según Saragoni y Ruiz (2005). (a) Componente norte-sur y (b) este-oeste.

7.2. Comparación entre Razones Espectrales H/V y Espectros de Respuesta

Comparando las frecuencias predominantes obtenidas a partir del espectro de respuesta normalizado para las estaciones, el método de las razones espectrales H/V calculadas a partir de eventos sísmicos y el método de las razones espectrales H/V calculadas a partir de señales provenientes de sismógrafos de banda ancha y campañas de toma de datos en terreno, se tiene la comparación propuesta en la Tabla 8.

Luego, comparando las frecuencias fundamentales obtenidas por los diferentes métodos se tiene una buena correlación en la mayoría de las estaciones en las que se denotan peaks predominantes. Incluso en la estación Iquique-Escuela Chipana se reproducen por los tres métodos los 2 peaks que presenta esta estación.

Tabla 8. Comparación de las frecuencias peaks obtenidas a través del método de las razones espectrales H/V para eventos sísmicos y vibraciones ambientales y espectros de respuesta.

Estación	Frecuencia predominante [Hz]			Observación
	H/V de Vibraciones Ambientales	H/V de eventos sísmicos	Espectro de Respuesta	
ALHO		6.3	7.7	
CUYA		2.4 - 4.9	5.6	H/V y espectro muestran dos peaks.
FUBA		Plano	Sin peak	
GO01		7.0	8.3	
HMBCX	Plano ¹	Plano	Sin peak	
IQEC	3.1 ²	2.3 - 7.9	3.2 - 8.3	H/V de eventos sísmicos y espectro muestran dos peaks.
IQID	Plano ²	Plano	Sin peak	
IQU	Plano ²	Plano	Sin peak	
LOA		Plano	Sin peak	
MNMCX	5.99 ¹	5.8	6.3	
PATCX	Plano ¹	5.6	5.1	
PB01	3.88 ¹	3.2	3.9	
PB08	5.32 ¹	4.2	5.0	
PB11	Plano ¹	Plano	Sin peak	H/V de difícil Interpretación
PICA	Plano ¹	4.9	5.3	
PISA		Plano	Sin peak	
PPAT		3.7	3.6	
PSGCX	Plano ¹	Plano	Sin peak	
T01A		1.3	4.8	
T02A		1.5	4.7	
T03A		6.7	6.9	
T04A		Plano	Sin peak	
T05A		Plano	Sin peak	

T06A		Plano	Sin peak	
T07A		2.5	2.7	
T08A		Plano	Sin peak	
T09A		Plano	Sin peak	
T10A		2.7	4.9	
T11A		1.2	5.9	El espectro posee un peak a 1.32 Hz, además el H/V posee varios Peaks
T12A		Plano	Sin peak	
T13A		2.1	2.2 - 10	El espectro posee dos peaks
TA01	Plano ¹	5.2	5.3	
TA02	6.71 ¹	6.8	8.3	

Nota: (1) corresponden a sismógrafos de banda ancha.

(2) corresponden a sismógrafos Kinematics Rangers uniaxiales.

7.3. Comparación entre Espectros de Respuesta Normalizados y Razones Espectrales H/V

Comparando las frecuencias predominantes obtenidas a través de la función de transferencia empírica para las estaciones de la ciudad de Iquique emplazadas sobre suelo, con las frecuencias peaks obtenidas por el método de las razones espectrales H/V aplicado a eventos sísmicos y la frecuencia peak del espectro de respuesta, se tienen los resultados de la Tabla 9.

Se observa una buena correlación entre los resultados obtenidos por la función de transferencia empírica para la ciudad de Iquique y sus frecuencias predominantes.

Tabla 9. Comparación de las frecuencias peaks obtenidas por función de transferencia empírica, método de las razones espectrales H/V para eventos y espectros de respuesta para las estaciones ubicadas en suelo para las estaciones ubicadas en suelo de la ciudad de Iquique.

Estación	Lugar	Frecuencia predominante [Hz]			
		NS	EW	H/V Eventos	Espectro
IQEC	Iquique - Escuela Chipana	2.6 - 7.7	3.5 - 7.9	2.3 - 7.9	3.2 - 8.3
T01A	Cerro Dragón	1.9	1.9		4.8
T02A	Ruta A16	2.4	1.6		4.7
T03A	Iquique - Regimiento Granaderos	7.1	8.3		6.9
TA02	Iquique - Cavanca	7.7	8.3	6.8	8.3

7.4. Condiciones Locales de la Región de Tarapacá

7.4.1 Ciudad de Iquique

Los resultados en la zona norte de Iquique en las estaciones Iquique Idiem (IQID), Iquique Cruz Roja (T04A), Iquique Serviu (T05A) e Iquique Hospital (IQU y T06A), asociados a razones espectrales H/V planas, son consistentes con los sondeos reportados por Becerra (2014) en la Figura 27.

El sondeo 3, por ejemplo, confirma que las estaciones ubicadas en el Hospital de Iquique (IQU y T06A) se encuentran directamente sobre el basamento rocoso. El sondeo 2, ubicado a pocos metros de la estación Iquique Cruz Roja (T04A), confirma la presencia del basamento a escasos metros de profundidad y una capa superficial de arena con presencia de gravas (ver Figura 27). Además, las razones espectrales de las estaciones T04A, T05A e IQID son planas, algo propio de aplicar esta técnica sobre un suelo rígido.

Los resultados del método SPAC y FK (Montalva and Bastías, 2014) permiten definir el perfil de velocidad de onda de corte para la estación Iquique Serviu (T05A), que se muestra en la Figura 28. A partir de esta figura es posible distinguir una pequeña capa de suelo sobre el basamento rocoso. En las estaciones T04A y T05A, la capa de suelo es tan delgada que, para todo efecto práctico, se pueden considerar como afloramiento rocoso.

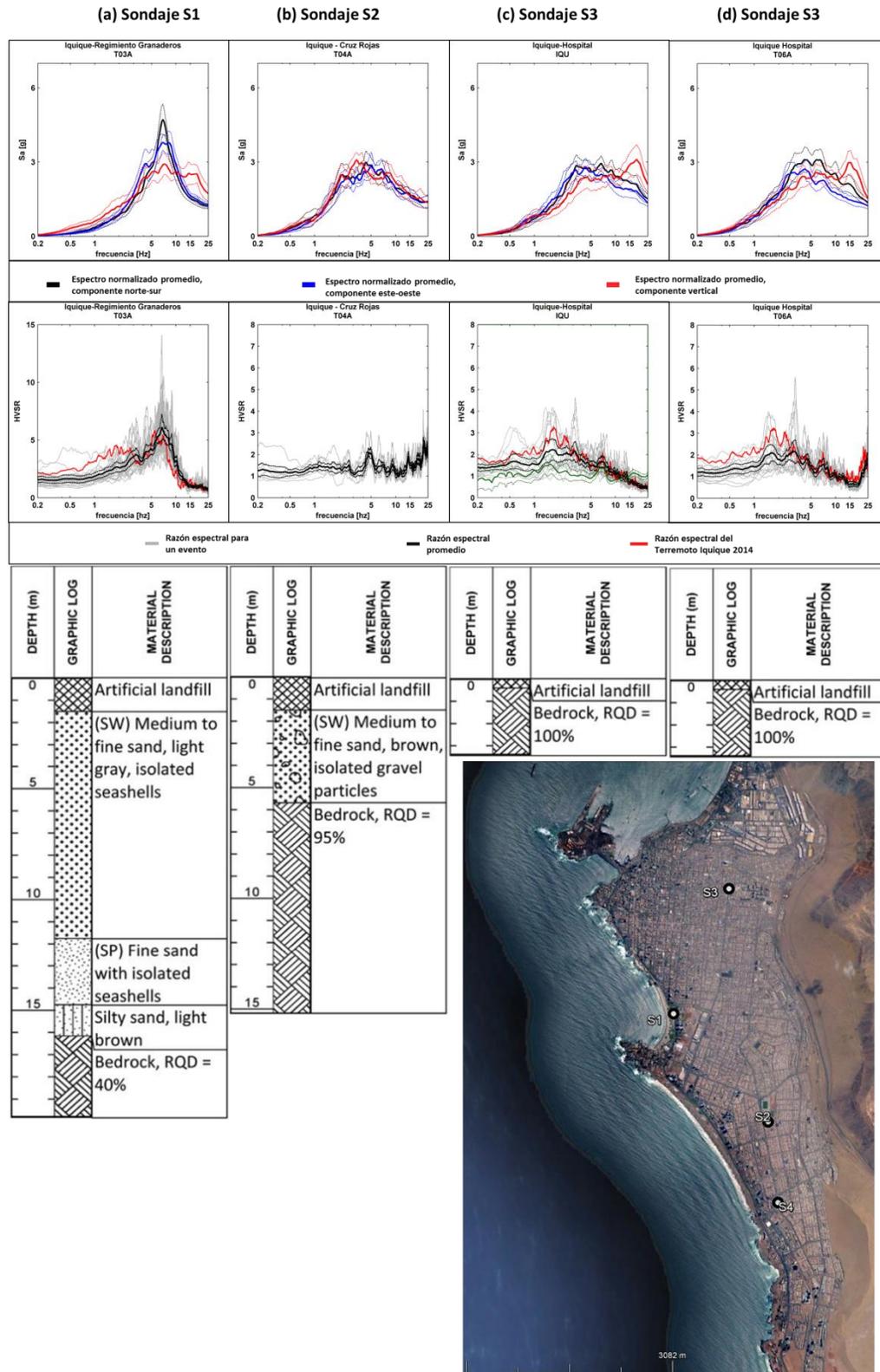


Figura 27. Razones espectrales H/V y espectros de respuesta normalizados para estaciones aledañas a sondajes en Iquique (Becerra 2014). Las estaciones corresponden a (a) Iquique Regimiento Granaderos (T03A), (b) Iquique Cruz Roja (T04A), (c) Iquique Hospital RENADIC (T06A) y (d) Iquique Hospital ONEMI (T06A).

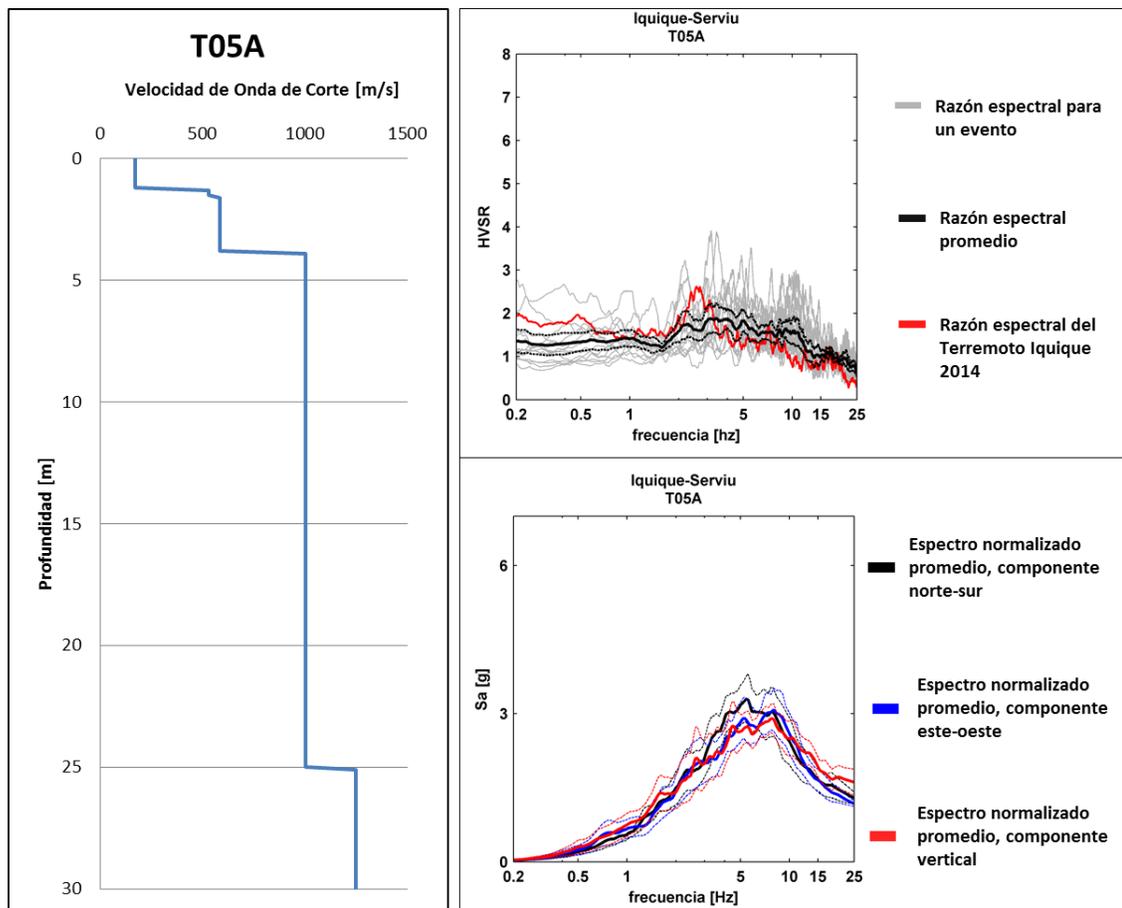


Figura 28. Perfil de velocidades de Montalva and Bastías (2014), razones espectrales H/V y espectros de respuesta normalizados para Iquique Serviu (T05A).

Para la ciudad de Iquique las estaciones que se encuentran sobre depósitos de suelo, se pueden clasificar en dos tipos. En primer lugar se tienen las ubicadas sobre depósitos marinos emplazadas acercándose hacia la línea de la costa. En este caso encontramos las estaciones Iquique Cavancha (TA02) e Iquique Regimiento Granaderos (T03A). El otro caso, se trata de las estaciones emplazadas sobre depósitos eólicos, acercándose hacia el farellón costero. Entre estas encontramos Iquique Escuela Chipana (IQEC), Iquique Cerro Dragón (T01A) e Iquique Ruta A16 (T02A).

En la ciudad de Iquique se tiene una buena correlación entre la ubicación de las estaciones y la geología de la zona. Además, hay concordancias con las microzonificaciones disponibles (Podestá, 2013; Becerra, 2014). La presencia de suelo tiene directa correlación con los sectores en los que se presencié daño para esta ciudad durante el terremoto de Iquique 2014 (Becerra et al., 2015).

7.4.2. Alto Hospicio

En la ciudad de Alto Hospicio se tienen dos estaciones (ALHO y T08A), las cuales se encuentran a poco más de 1100 metros de distancia y en las que se tienen marcadas diferencias. En la Tabla 10 se muestran las aceleraciones máximas registradas para algunos eventos en ambas estaciones.

Tabla 10. Comparación entre estaciones en Alto Hospicio (T08A y ALHO).

Magnitud	Fecha	Hora	Aceleración Máxima [g]	
			ALHO	T08A
6.2	22-3-2014	12:59	0.03	0.02
6.4	17-3-2014	5:11	0.03	0.02
6.5	3-4-2014	1:58	0.13	0.07
7.7	3-4-2014	2:43	0.6	0.36
8.2	1-4-2014	23:46	1.10	0.44

En esta tabla se identifica que ALHO registra aceleraciones marcadamente mayores en comparación a T08A. De hecho, ALHO es la estación que registra mayores aceleraciones para la gran mayoría de los eventos.

En las cartas geológicas y en las microzonificaciones de la zona (Podestá 2013), se tiene que Alto Hospicio está ubicado sobre gravas con una alta velocidad de onda de corte, lo cual estaría en concordancia con las bajas aceleraciones y amplificaciones para el Terremoto de 2014 y las razones espectrales planas registradas en T08A (Figura 20). Distinto es el caso de ALHO con aceleraciones y amplificaciones espectrales considerablemente mayores. Los contrastes entre estas estaciones se muestran en la Figura 29.

Este hecho se puede explicar por la presencia de un depósito de relleno artificial de una mala calidad con un marcado contraste de impedancia con respecto a la grava subyacente. Esto originaría el peak en su razón espectral, además de una marcada modificación en el contenido de frecuencias (hacia frecuencias más bajas), producto presumiblemente de los efectos no lineales en la curva de degradación del suelo (Figura 20). Se desestima el efecto de borde libre que podría ocurrir en ALHO, que se ubica más cerca al farellón costero que T08A, pues este efecto influiría sólo hasta un kilómetro de distancia del borde (García-Pérez, 2015) y ALHO está ubicado a una mayor distancia del borde del farellón costero.

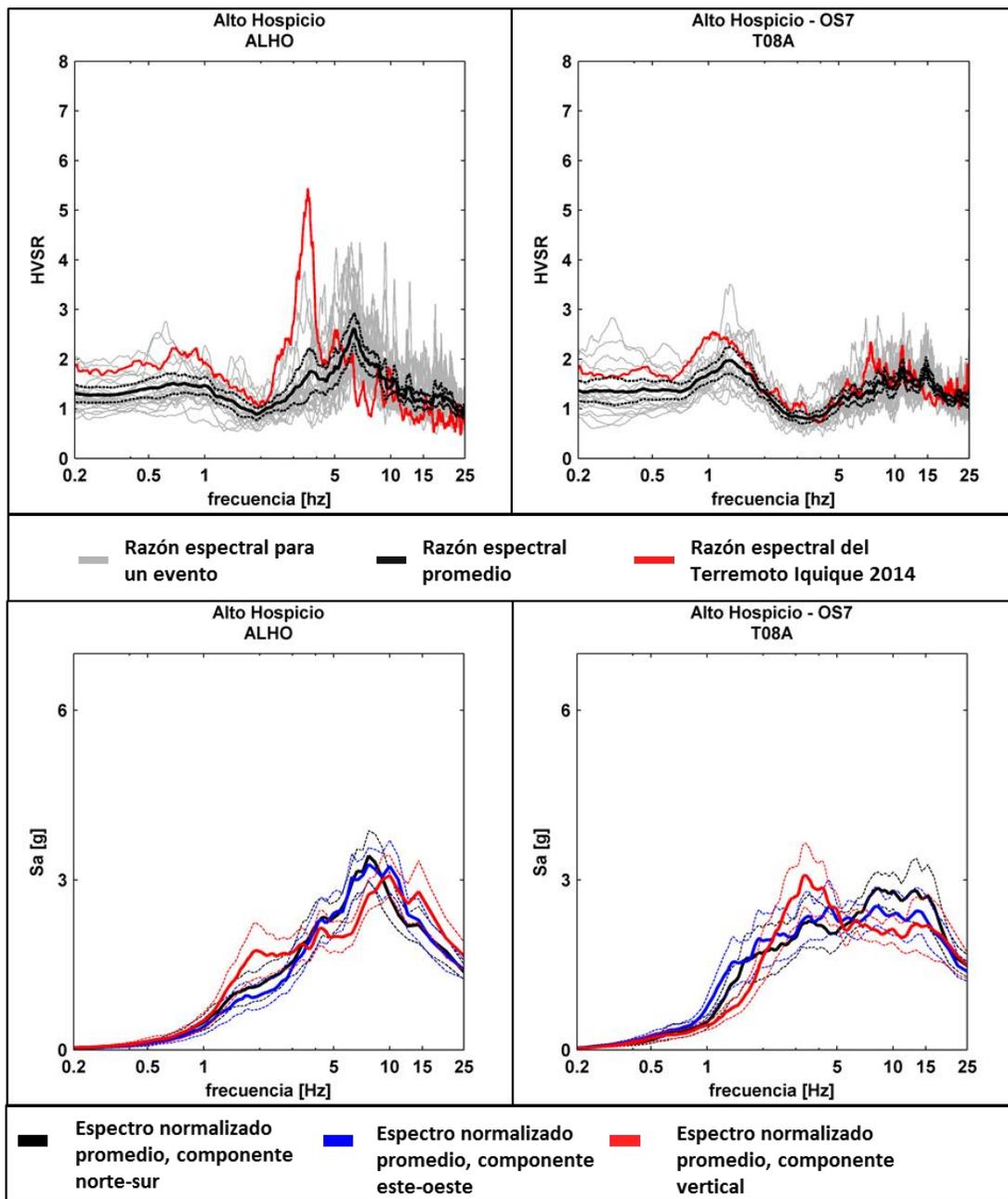


Figura 29. Razones espectrales H/V y espectros de respuesta normalizados para las estaciones de Alto Hospicio.

7.4.3. Pozo Almonte y Huara

Pozo Almonte y Huara son ciudades que registraron altas aceleraciones en relación a sus distancias hipocentrales para el Terremoto de 2014 (ver Figura 26). En ambos casos, se tiene la presencia de secuencias geológicas sedimentarias ubicadas sobre el basamento rocoso, como lo muestra Montalva (2014) y lo corroboran los planos geológicos disponibles (SERNAGEOMIN, 2003). Ambas estaciones presentan una reducción de sus frecuencias predominantes durante

el terremoto de 2014, lo cual podría explicarse por los efectos no lineales ocasionados por la degradación de rigidez del suelo (ver Figura 30).

Para el caso de la localidad de Huara, se tiene otra estación (HUAR) ubicada en la comisaria a pocos metros de distancia, en la cual se tiene solo un registro con una frecuencia predominante similar a la de T10A.

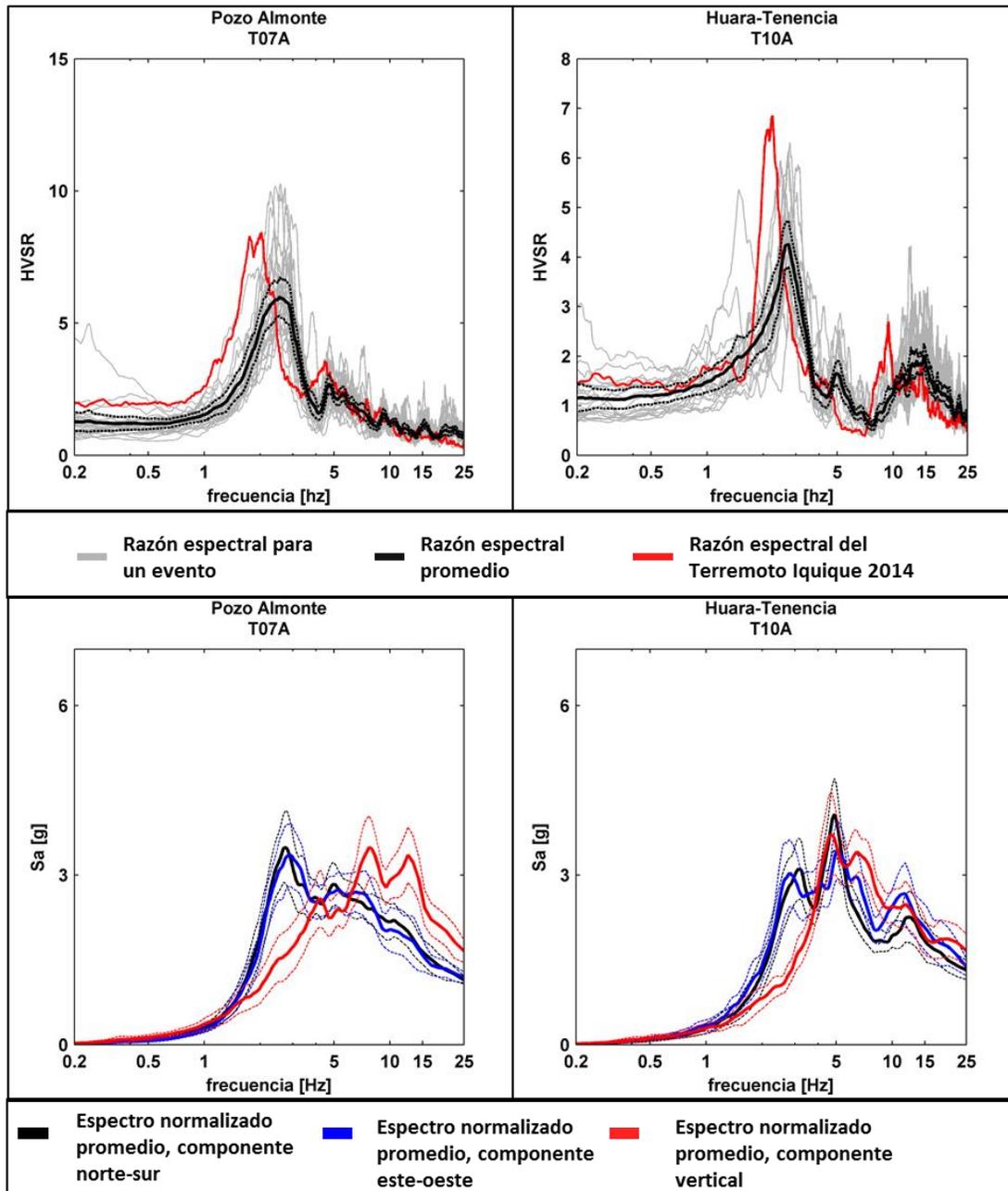


Figura 30. Razones espectrales H/V y espectros de respuesta normalizados para las estaciones de Pozo Almonte (T07A) y Huara (T10A).

7.4.4. Pica

En la localidad de Pica, se tienen dos estaciones, T13A y PICA, las cuales presentan distintas frecuencias predominantes (ver Figura 31). Esto se podría explicar por un cambio en el espesor del depósito de suelo, diferentes propiedades del depósito, o bien, una combinación de ambas. Cabe destacar que ambas estaciones se encuentran separadas 800 metros, aproximadamente.

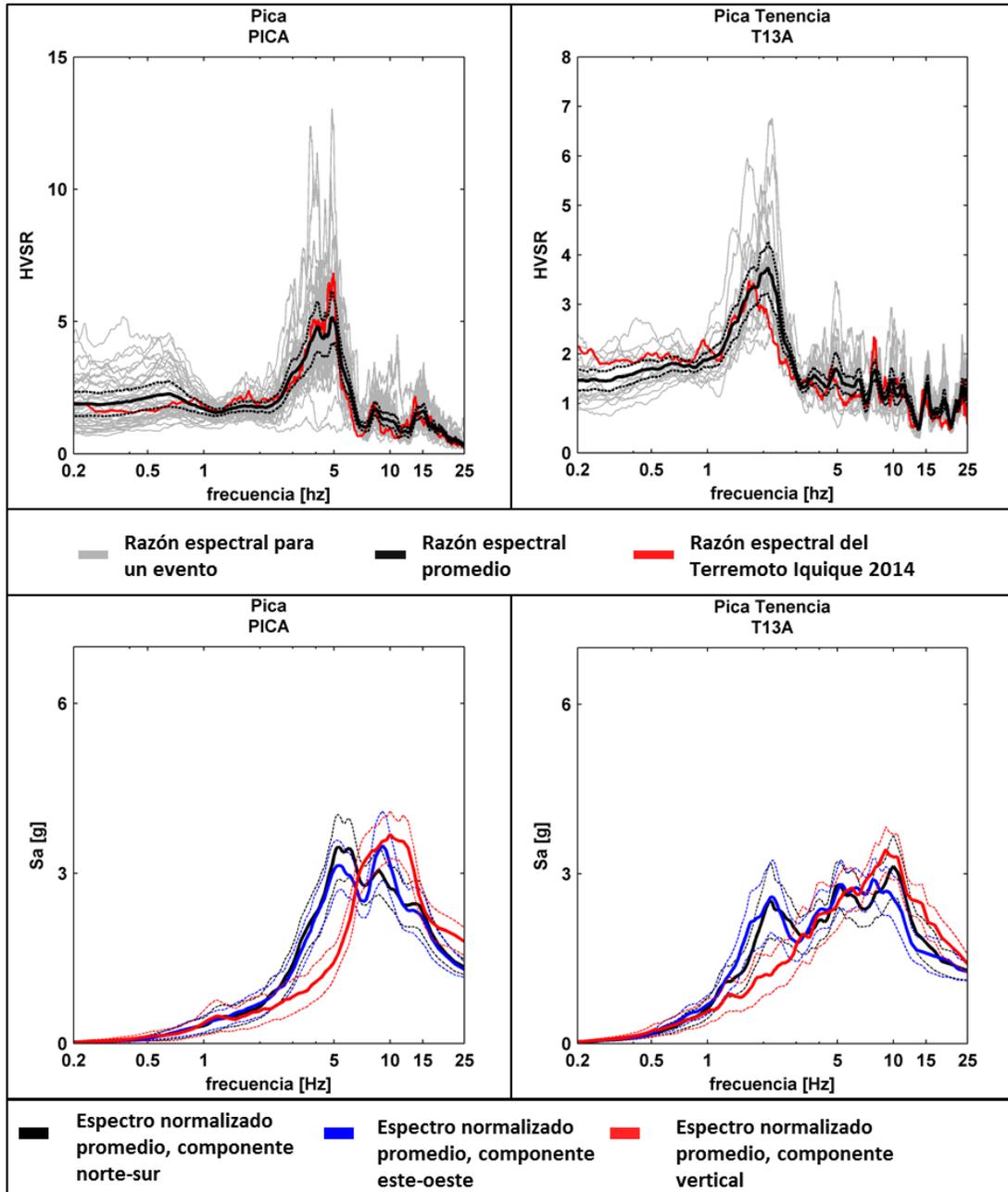


Figura 31. Razones espectrales H/V y espectros de respuesta normalizados para las estaciones de Pica (PICA y T13A).

7.4.5. Quebrada de Aricilda

La estación Quebrada de Aricilda (PB11) registró grandes aceleraciones durante el terremoto de 2014, si se considera la curva de atenuación de la Figura 26.

Las razones espectrales H/V calculadas a partir de eventos sísmicos y sismógrafos de banda ancha no presentan un peak claro, ni tampoco se puede atribuir a respuesta plana.

La estación se ubica en el borde de un acantilado de 20 metros de alto (Figura 32), aproximadamente. Por ende, los efectos topográficos producto tanto de las estructuras bajo la cota de la estación como por sobre esta podrían explicar su comportamiento.



Figura 32. Estación Quebrada de Aricilda (PB11)

7.4.6. Cuya

En el caso de la estación CUYA, llama la atención que en su razón espectral algunos eventos (anteriores a 2011) y otros (posteriores al mismo año) presenten distintas frecuencias predominantes. Ese año, se cambió el sensor de la estación. La presencia de dos peaks a distinta frecuencia puede explicarse a un cambio de lugar de la estación del cual no se tiene registro. Este cambio a su vez, tiene relación con la ubicación de Cuya emplazada en un antiguo lecho de río conformado probablemente por depósitos aluviales. La proximidad a los bordes de este lecho puede estar asociado (además de efectos topográficos) a variaciones de la profundidad del depósito de suelo, ocasionando cambios en la frecuencia predominante que detecta la razón espectral H/V.

7.4.7. Pisagua

En la localidad de Pisagua se tienen 3 estaciones con una respuesta plana (ver Figura 33). En el caso de las dos estaciones ubicadas en la comisaria (T09A y PISA), esta respuesta se puede explicar porque las estaciones están sobre el mismo afloramiento rocoso. Por otro lado, la estación PSGCX se ubica a más de 9 kilómetros de distancia de las otras dos sobre otro afloramiento rocoso.

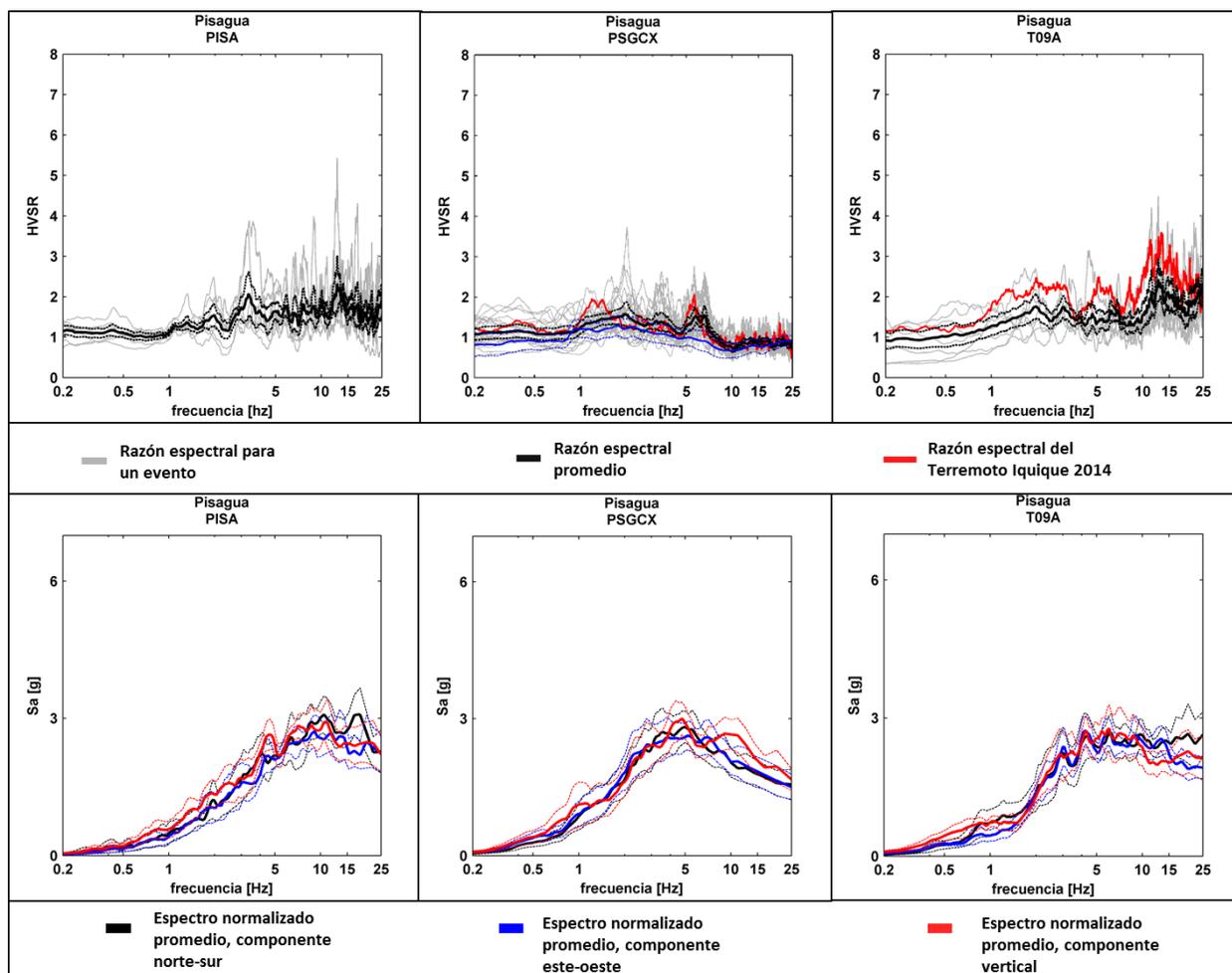


Figura 33. Razones espectrales H/V y espectros de respuesta normalizados para las estaciones de Pisagua (PISA, PSGCX y T09A).

7.5. Comparación con Otros Estudios

7.5.1. Comparación de las Frecuencias Predominantes

Montalva y Bastías (2014) determinaron a partir de métodos geofísicos de ondas superficiales SPAC y FK perfiles de velocidad de onda de corte en profundidad en las inmediaciones de muchas de las estaciones de la Región de Tarapacá. A partir de estos perfiles de velocidad, es

posible obtener una frecuencia fundamental a partir del modelo unidimensional de propagación vertical de ondas de corte.

$$f = \frac{V_s}{4 \cdot H} \quad (13)$$

Donde V_s corresponde a la velocidad de onda corte ponderada.

$$V_s = \frac{H}{\sum \frac{H_i}{V_{s_i}}} \quad (14)$$

Donde H_i y V_{s_i} corresponden al espesor de cada capa de suelo y su velocidad de onda de corte, respectivamente. Por otro lado, H corresponde al espesor total del depósito hasta la roca.

La comparación de la frecuencia calculada a partir de los resultados de Montalva y Bastías (2014) y los resultados del método de las razones espectrales de eventos sísmicos se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11: Comparación de los resultados de teoría unidimensional y de razones espectrales H/V.

Estación	Teoría Unidimensional			H/V de Eventos Sísmicos
	H [m]	Vs [m/s]	f=Vs/4H [Hz]	f [Hz]
Iquique Serviu (T05A)	25.1	756	7.5	Plano
Iquique Ruta 16 (T02A)	75.1	431	1.4	1.9
Alto Hospicio (T08A)	42.2	814	9.8	Plano
Pozo Almonte (T07A)	34.6	351	2.5	3.44
Humberstone (HMBCX)	9.5	67	12.9	Plano
Pica (T13A)	28.6	346	3.0	2.1
Huara (T10A)	17	300	4.4	2.68
Pisagua (PSGCX)	14.5	1294	22.2	Plano
Iquique Regimiento Granaderos (T03A)	50	1000	5.0	6.72

Nota: Datos de profundidad H y velocidad de onda de corte Vs reportados en Montalva y Bastías (2014).

7.5.2. Comparación de Razones Espectrales H/V

Por otro lado, Montalva y Bastías (2014) realizaron mediciones de vibraciones ambientales a partir de las cuales calcularon razones espectrales en algunas estaciones. La Figura 34 compara las curvas obtenidas en aquel estudio con las curvas de eventos sísmicos de la Figura

20 para las estaciones Ruta A16 (T02A), Iquique Serviu (T05A), Iquique Hospital (T06A), Pozo Almonte (T07A) y Pisagua (T09A). En general, se tiene una buena correlación en la forma de las curvas. Sin embargo, las frecuencias predominantes de las estaciones T02A y T07A obtenidas a partir de registros sísmicos son menores que las obtenidas por Montalva y Bastías (2014).

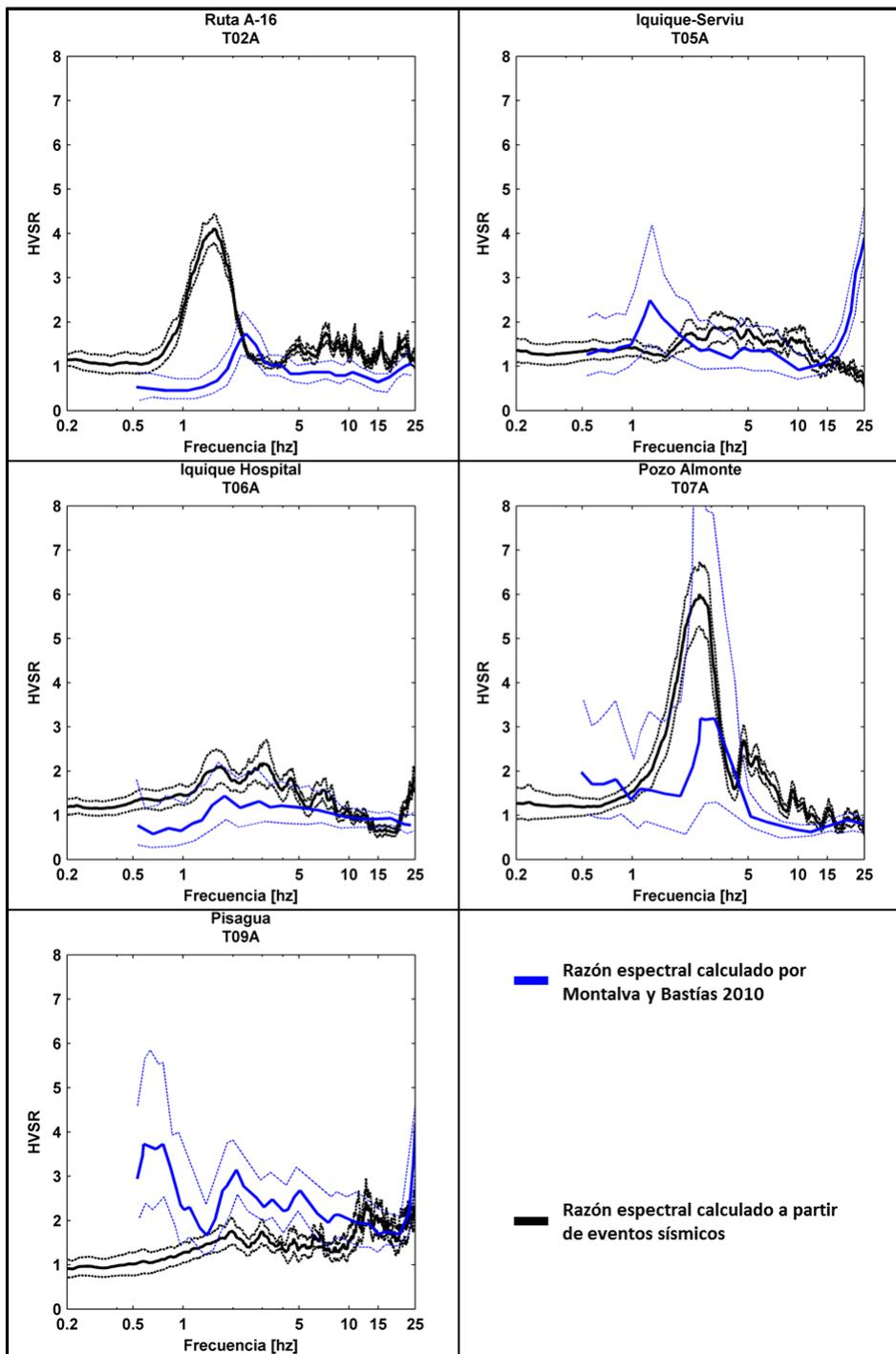


Figura 34. Comparación entre las curvas de razones espectrales calculada por Montalva y Bastías (2014) y las calculadas a partir de registros sísmicos.

8. Conclusiones y Recomendaciones

8.1. Conclusiones

A partir del análisis de los resultados se desprenden las siguientes conclusiones con respecto a los efectos de sitio en las estaciones sismológicas de la Región de Tarapacá.

Existe una gran cantidad de estaciones sobre suelos altamente competentes o afloramientos rocosos con razones espectrales planas. Estas estaciones son Fuerte Baquedano (FUBA), Humberstone (HMBCX), Iquique Idiem (IQID), Iquique Hospital (IQU), Iquique Cruz Roja (T04A), Iquique Serviu (T05A), Iquique Hospital (T06A), OS7 de Alto Hospicio (T08A), Aduana Río Loa (LOA), Pisagua (T09A, PISA y PSGCX) y Mamiña (T12A).

Las razones espectrales H/V permiten identificar efectos de sitio cuando las amplitudes máximas de las razones calculadas a partir de vibraciones ambientales y eventos sísmicos son mayores a dos. Los principales efectos de sitio se identificaron en dos sectores. El primero corresponde a las estaciones ubicadas en la depresión intermedia en las ciudades de Huará (HUAR y T10A), Pozo Almonte (T07A), Pica (PICA y T13A) y Cuya (CUYA). Los efectos de sitio de estas estaciones se explican por su ubicación sobre secuencias geológicas sedimentarias. Las razones espectrales de estas estaciones poseen peaks de frecuencias predominantes de entre 2 a 6 [Hz] con amplitud de razones espectrales entre 4 a 7.

El segundo sector corresponde a las estaciones de la ciudad de Iquique que se emplazan sobre depósitos eólicos, acercándose hacia el farellón costero, o bien sobre depósitos marinos, hacia el borde costero. Las razones espectrales de las estaciones ubicadas próximas al farellón costero poseen frecuencias de entre 1 y 2 [Hz] con amplitud de razones espectrales aproximadamente de 4. Por otro lado, las estaciones ubicadas en depósitos marinos próximos al borde costero, presentan frecuencias predominantes entre 8 y 10 [Hz] en sus curvas de razones espectrales, con amplitudes entre 3 y 6.

Un caso especial es la estación de Alto Hospicio (ALHO), cuyos resultados no concuerdan con los mapas geológicos y las microzonificaciones sísmicas disponibles en la ciudad. Es probable que la estación se ubique sobre un depósito de suelo artificial.

Las razones espectrales H/V de las estaciones Quebrada de Aricilda (PB11) y Camiña (T11A) son difíciles de interpretar. Sin embargo, en el caso de Quebrada Aricilda (PB11), se observan marcadas similitudes entre la razón espectral calculada a partir del sismógrafo de banda ancha y la calculada a partir de registros sísmicos, que pueden ser atribuibles a características topográficas de la estación. En el caso de Camiña (T11A), la razón espectral H/V calculada a partir de registros sísmicos presenta varios peaks, con un peak amplio a baja frecuencia y otros 5 peaks a mayor frecuencia.

Otro fenómeno que se puede apreciar a partir de las razones espectrales H/V en algunas estaciones es la reducción de la frecuencia predominante durante el Terremoto de Iquique de 2014. Esta reducción se puede explicar por la degradación de rigidez del suelo al ser sometido a grandes deformaciones. Este hecho se manifiesta en las estaciones de Huará (T10A), Pozo

Almonte (T07A), Regimiento Granaderos (T03A), Mañita (MNM CX), Escuela Chipana (IQEC), Chusmiza (GO01), Cuya (CUYA) y Alto Hospicio (ALHO). En los casos de Pica (T13A y PICA), no se distingue un cambio en la frecuencia predominante del Terremoto y los demás sismos. Cabe mencionar, además, que las estaciones de Alto Hospicio (ALHO), Huara (T10A) y Pozo Almonte (T07A) registraron aceleraciones muy por sobre las propuestas por curvas de atenuación en roca para el Terremoto del 2014.

Se encontró una buena correlación entre las frecuencias predominantes obtenidas por el método de las razones espectrales y los espectros de respuesta (Tabla 8). También, tanto los espectros de respuesta normalizados por una estación de referencia obtenidos para la ciudad de Iquique, como las razones espectrales H/V de las mismas estaciones muestran frecuencias predominantes similares (Tabla 9).

Se corrobora que las razones espectrales H/V calculadas a partir de registros de eventos sísmicos son similares a las calculadas con vibraciones ambientales registradas ya sea con sismógrafos de banda ancha o con sismógrafos uniaxiales (Rangers de Kinematics). Esta concordancia se puede deber principalmente a que el suelo se comporta linealmente frente a eventos de baja magnitud. Cabe mencionar que la gran mayoría de los eventos considerados en este trabajo corresponden a eventos de magnitud de momento entre 5 y 7. El comportamiento deja de ser elástico en el caso del Terremoto de Iquique 2014, de magnitud 8.2.

Se corrobora, acorde a la teoría unidimensional clásica, que el principal parámetro que influye en la respuesta del depósito de suelo corresponde al contraste de impedancia, el cual es una medida del contraste de rigidez y densidad entre el suelo y la roca basal. En general, para el caso de las estaciones sismológicas de la Región de Tarapacá, los efectos de sitio se concentran en estaciones que se ubican sobre depósitos de suelo (ya sean naturales o artificiales) que se encuentran sobre un basamento rocoso con una velocidad de onda de corte considerablemente mayor.

Se debe tener especial cuidado con la interpretación de las razones espectrales H/V calculadas a partir de vibraciones ambientales medidas por acelerógrafos, ya que la rigidez de estos instrumentos no permiten registrar vibraciones del suelo, sino más bien ruido electrónico. Por ende, la razón espectral horizontal sobre vertical de estos instrumentos arroja siempre una respuesta plana (ver ejemplo en la Figura 19). La estación Iquique-Cavanca (TA02) es una excepción, ya que el elevado nivel de ruido ambiental en torno a la estación le permite al acelerógrafo medir vibraciones provenientes del suelo.

8.2. Recomendaciones

El principal aspecto a mejorar corresponde al suavizado de la Transformada Rápida de Fourier de las componentes previo a la aplicación de las razones espectrales. En este trabajo, la ventana de suavizado se fijó en 0.25 [Hz] en cada dirección con una media móvil. Dado que las razones espectrales se grafican en escala logarítmica, el suavizado resulta muy agresivo a baja frecuencia, pero no a alta frecuencia. Esto se traduce en una mayor inestabilidad de la curva a

frecuencias más altas. Este efecto se aprecia, por ejemplo, en las razones espectrales de Aduana Río Loa (LOA), Pisagua (PISA y T09A) e Iquique Hospital (T06A).

9. Bibliografía

- Angermann, D., Klotz, J. & Reigber, C. (1999). Space-geodetic estimation of the Nazca-South America Euler vector. *Earth and Planetary Science Letters*, 171(3): 329-334.
- Arias, A. (1970) *Measure of earthquake intensity*.
- Arias, A. (1996) Local directivity of strong ground motion. In *Proc. of 11th World Conference on Earthquake Eng., Acapulco, Mexico.*, pp. 23-28.
- Ashford, S. A., Sitar, N., Lysmer, J. & Deng, N. (1997). Topographic effects on the seismic response of steep slopes. *Bulletin of the seismological society of America*, 87(3): 701-709.
- Astroza, M. & Astroza, R. (2010). Intensidades y daños del terremoto de Tocopilla del 14 de Noviembre de 2007. *Décimo congreso de la Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica*.
- Becerra, A., Sáez, E. & Podestá, L. (2015). El Terremoto de Iquique 2014: Comparación entre condiciones locales del suelo y daños observados en Iquique y Alto Hospicio. *XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA 2015*.
- Becerra, A. P. (2014). Seismic microzoning of Arica and Iquique, Chile. *Memoria para optar al grado de Magister, Universidad Católica*.
- Béjar-Pizarro, M., Carrizo, D., Socquet, A., Armijo, R., Barrientos, S., Bondoux, F., Bonvalot, S., Campos, J., Comte, D. & De Chabaliér, J. (2010). Asperities and barriers on the seismogenic zone in North Chile: state-of-the-art after the 2007 Mw 7.7 Tocopilla earthquake inferred by GPS and InSAR data. *Geophysical Journal International*, 183(1): 390-406.
- Bonnefoy-Claudet, S., Baize, S., Bonilla, L. F., Berge-Thierry, C., Pasten, C., Campos, J., Volant, P. & Verdugo, R. (2009). Site effect evaluation in the basin of Santiago de Chile using ambient noise measurements. *Geophysical Journal International*, 176(3): 925-937.
- Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F. & Bard, P.-Y. (2006). The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: a literature review. *Earth-Science Reviews*, 79(3): 205-227.
- Börgel, R. (1983). Geomorfología. *Geografía de Chile*, 2: 182.
- Bouckovalas, G. D. & Papadimitriou, A. G. (2005). Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(7): 547-558.
- Chavez-Garcia, F. J. & Cuenca, J. (1998). Site effects and microzonation in Acapulco. *Earthquake Spectra*, 14(1): 75-93.
- Chlieh, M., Perfettini, H., Tavera, H., Avouac, J. P., Remy, D., Nocquet, J. M., Rolandone, F., Bondoux, F., Gabalda, G. & Bonvalot, S. (2011). Interseismic coupling and seismic potential along the Central Andes subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, 116(B12).
- Comte, D. & Pardo, M. (1991). Reappraisal of great historical earthquakes in the northern Chile and southern Peru seismic gaps. *Natural Hazards*, 4(1): 23-44.

Contreras, V. & Boroschek, R. (2015). Curvas de Atenuación Espectrales para Sismos Chilenos. *XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA 2015*.

Delouis, B., Pardo, M., Legrand, D. & Monfret, T. (2009). The Mw 7.7 Tocopilla earthquake of 14 November 2007 at the southern edge of the northern Chile seismic gap: Rupture in the deep part of the coupled plate interface. *Bulletin of the seismological society of America*, 99(1): 87-94.

Faccioli, E. (1991) Seismic amplification in the presence of geological and topographical irregularities. In *Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics (1991: March 11-15; St. Louis, Missouri)*. Missouri S&T (formerly the University of Missouri--Rolla).

García-Pérez, T. & Maringue, J. (2015) Amplificación de Ondas Sísmicas por Efectos de Borde Libre. *XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica*.

Kendrick, E., Bevis, M., Smalley, R., Brooks, B., Vargas, R. B., Lauria, E. & Fortes, L. P. S. (2003). The Nazca–South America Euler vector and its rate of change. *Journal of South American Earth Sciences*, 16(2): 125-131.

Konno, K. & Ohmachi, T. (1998). Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(1): 228-241.

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, p.

Lay, T., Yue, H., Brodsky, E. E. & An, C. (2014). The 1 April 2014 Iquique, Chile, Mw 8.1 earthquake rupture sequence. *Geophysical Research Letters*, 41(11): 3818-3825.

Lermo, J. & Chávez-García, F. J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bulletin of the seismological society of America*, 83(5): 1574-1594.

Leyton, F., Ramírez, S. & Vásquez, A. (2012) Uso y Limitaciones de la Técnica de Microvibraciones (RHV) en la Clasificación Sísmica de Suelos. In *VII Congreso Chileno de Geotécnica, Concepción, Chile*.

Leyton, F., Ruiz, S., Sepúlveda, S., Contreras, J., Rebolledo, S. & Astroza, M. (2013). Microtremors' HVSR and its correlation with surface geology and damage observed after the 2010 Maule earthquake (Mw 8.8) at Talca and Curicó, Central Chile. *Engineering Geology*, 161: 26-33.

Madariaga, R. (1998). Sismicidad de Chile. *Física de la Tierra*(10): 221.

Malgrange, M. & Madariaga, R. (1983). Complex distribution of large thrust and normal fault earthquakes in the Chilean subduction zone. *Geophysical Journal International*, 73(2): 489-505.

Marquardt, C., Marinovic, N., and Muñoz, V. (2008). Geología de las ciudades de Iquique y Alto Hospicio, Región de Tarapacá. *Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica*, 113:33.

Métois, M., Socquet, A., Vigny, C., Carrizo, D., Peyrat, S., Delorme, A., Maureira, E., Valderas-Bermejo, M.-C. & Ortega, I. (2013). Revisiting the North Chile seismic gap segmentation using GPS-derived interseismic coupling. *Geophysical Journal International*, 194(3): 1283-1294.

- Montalva, G. & Bastías, N. (2014). Mediciones Geofísicas: Estaciones Acelerográficas Norte de Chile. *Fundación Chilena de Geotecnia*.
- Montessus De Ballore, F. (1913) Historia sísmica de los andes meridionales al sur del paralelo XVI. In *Anales de la Universidad de Chile*., pp. Pág. 129-176.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, 30(1).
- Pastén, C., Lezana, F., Leyton, F. & Ruiz, S. (2015) RAZONES ESPECTRALES H/V DE UNA RED TEMPORAL DE ESTACIONES SISMOLÓGICAS EN LA CUENCA DE SANTIAGO. In *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica*.).
- Pasten, C. R. (2007). Respuesta Sísmica de la Cuenca de Santiago. *Memoria para optar al grado de Magister, Universidad de Chile*.
- Peyrat, S., Madariaga, R., Buforn, E., Campos, J., Asch, G. & Vilotte, J. (2010). Kinematic rupture process of the 2007 Tocopilla earthquake and its main aftershocks from teleseismic and strong-motion data. *Geophysical Journal International*, 182(3): 1411-1430.
- Podestá, L. (2013). Microzonificación Sísmica de las ciudades de Iquique y Alto Hospicio, Región de Tarapacá. *Tesis para optar al grado de Ingeniería Civil. Universidad Diego Portales*.
- Press, W. H. (1996). *FORTRAN Numerical Recipes: Numerical recipes in FORTRAN 90*. Cambridge University Press, p.
- Ruiz, S., Metois, M., Fuenzalida, A., Ruiz, J., Leyton, F., Grandin, R., Vigny, C., Madariaga, R. & Campos, J. (2014). Intense foreshocks and a slow slip event preceded the 2014 Iquique Mw 8.1 earthquake. *Science*, 345(6201): 1165-1169.
- Ruiz, S. & Saragoni, G. R. (2005). Fórmulas de Atenuación para la Subducción de Chile considerando los dos mecanismos de Sismogénesis y los Efectos del Suelo. *Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica*.
- Scholz, C. H. & Campos, J. (2012). The seismic coupling of subduction zones revisited. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, 117(B5).
- Schurr, B., Asch, G., Hainzl, S., Bedford, J., Hoechner, A., Palo, M., Wang, R., Moreno, M., Bartsch, M. & Zhang, Y. (2014). Gradual unlocking of plate boundary controlled initiation of the 2014 Iquique earthquake. *Nature*.
- Seed, H. B. (1987). *Relationships between soil conditions and earthquake ground motions in Mexico City in the earthquake of Sept. 19, 1985*. Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California; Springfield, Va.: available from the National Technical Information Service, p.
- Seed, H. B. & Idriss, I. M. (1969). *Influence of soil conditions on ground motions during earthquakes*. University of California, Institute of Transportation and Traffic Engineering, Soil Mechanics Laboratory, p.
- Sernageomin (2003). Mapa Geológico de Chile: versión digital. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital*.

Thiele, R. & Cubillos, E. (1980). *Hoja Santiago: región metropolitana: carta geológica de Chile escala 1: 250.000*. Instituto de Investigaciones Geológicas, p.

Tokimatsu, K. & Kōgakkai, J. (1995). *Geotechnical site characterization using surface waves*. p.

Trigo, T. A. (2007). Influencia de la Amplificación Local de las Ondas Sísmicas y la Interacción Suelo-Fundación en el Puente Marga-Marga. *Memoria para optar al grado de Magister, Universidad de Chile*.

Vargas, G., Ortlieb, L., Chapron, E., Valdes, J. & Marquardt, C. (2005). Paleoseismic inferences from a high-resolution marine sedimentary record in northern Chile (23 S). *Tectonophysics*, 399(1): 381-398.

Vargas, G., Ruiz, S., Leyton, F., Abrahami, R., Le Roux, J., Pantoja, S., Lange, C., Contreras Reyes, E. & Campos, J. (2014) Assessing giant tsunamigenic subduction earthquakes in the Northern Chile Seismic Gap during the last two millennia. In *AGU Fall Meeting Abstracts.*, vol. 1, pp. 4470.

Vigny, C., Rudloff, A., Ruegg, J.-C., Madariaga, R., Campos, J. & Alvarez, M. (2009). Upper plate deformation measured by GPS in the Coquimbo Gap, Chile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 175(1): 86-95.

Yagi, Y., Okuwaki, R., Enescu, B., Hirano, S., Yamagami, Y., Endo, S. & Komoro, T. (2014). Rupture process of the 2014 Iquique Chile Earthquake in relation with the foreshock activity. *Geophysical Research Letters*, 41(12): 4201-4206.

Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H. K. & Somerville, P. G. (2006). Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period. *Bulletin of the seismological society of America*, 96(3): 898-913.