



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

**CURVAS DE ATENUACIÓN PARA TERREMOTOS INTRAPLACA E
INTERPLACA EN LA ZONA DE SUBDUCCIÓN CHILENA**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA, MENCIÓN
INGENIERÍA SÍSMICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

BENJAMÍN RODO IDINI ZABALA

PROFESOR GUÍA:
FABIÁN ROJAS BARRALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SERGIO RUIZ TAPIA
CÉSAR PASTÉN PUCHI

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por CONICYT

SANTIAGO DE CHILE
MARZO 2016

Curvas de atenuación para terremotos intraplaca e interplaca en la zona de subducción chilena

La zona de subducción en Chile se caracteriza por poseer una actividad sísmica mayor en comparación con otras partes del mundo, con terremotos de gran magnitud cuyas zonas afectadas varían en función del contacto sismogénico y la profundidad a la que ocurren. El peligro sísmico es una potencial herramienta para proyectar las distribuciones espaciales y temporales de dichas zonas. Éste se basa principalmente en conocer estimaciones o modelos que predigan los posibles movimientos superficiales máximos según una serie de parámetros indicadores de las características sísmicas de la zona y de los suelos en cuestión. La necesidad de estas estimaciones se ha traducido en el desarrollo de modelos empíricos de atenuación para diferentes tipos de terremotos y regiones. En la zona de subducción chilena han ocurrido tres terremotos importantes en los últimos años, Maule 2010, Iquique 2014 y Illapel 2015, que han aportado nuevos y mejores datos a través de modernos instrumentos que permiten obtener aceleraciones espectrales para un rango de periodos más amplio que estudios anteriores. Esto permite mejorar y proponer fórmulas de atenuación que consideren los efectos de sismos sobre estructuras de periodo largo, como edificios equipados con aislación sísmica, y estructuras rígidas de periodo corto, como instalaciones de equipos a nivel del suelo y elementos masivos de hormigón.

Utilizando una base de datos de registros de aceleraciones de terremotos de la zona de subducción chilena, se generan curvas de atenuación horizontales para PGA, PGD y aceleraciones y pseudodesplazamientos espectrales para osciladores de periodos entre 0.01 [s] y 10 [s] con un 5% de amortiguamiento crítico. Las variables del modelo corresponden a la magnitud momento (M_w), la profundidad de foco (H), la distancia más cercana al área de ruptura (R_{rup}) en el caso de terremotos interplaca y la distancia hipocentral (R_{hip}) para intraplaca. La amplificación dinámica de suelos se evalúa a partir de la determinación de un nuevo modelo empírico para el factor de amplificación, en función del periodo predominante del suelo (T^*) y la velocidad de onda de corte de los 30 [m] más superficiales (V_{S30}).

Los resultados de esta tesis son válidos para distancias máximas de 400 [km], donde para un mismo tipo de suelo, es posible identificar aceleraciones máximas diferentes en cada tipo de terremoto. Los mecanismos intraplaca poseen valores más altos para periodos cortos y PGA en distancias cercanas a la fuente, mientras que los interplaca son mayores en periodos intermedios-largos y distancias medias-lejanas. Al utilizar un modelo de amplificación de suelos más detallado que estudios anteriores, es posible reproducir espectros de sitios de diferentes formas y amplitudes, incluso el caso específico del de dos puntas visto en registros reales para ciertos tipos de suelos durante el terremoto de Maule 2010.

*A las familias trabajadoras de Iquique y el Maule
que después de perderlo todo,
levantaron nuevamente cuatro paredes y un techo de dignidad.*

Agradecimientos

En primera instancia al Centro Sismológico Nacional por facilitar gran parte de los registros de aceleraciones utilizados. En específico a Felipe Leyton, quién estuvo siempre dispuesto a colaborar con pedidos específicos de datos de la red.

Con la misma motivación a RENADIC, por facilitar la otra gran porción de registros generados por la red del Departamento de Ingeniería Civil.

Al Profesor César Pastén, por contribuir de manera desinteresada en la generación de una de las clasificaciones de suelos utilizada. Además por facilitar estudios geotécnicos no publicados realizados por él, poniendo siempre los intereses de la ciencia y el rigor antes de cualquier otro.

A mis compañeros memoristas del magíster, quienes habitan el cuarto piso del departamento, en un cubículo de vidrio desde las 9 am hasta las 10 pm sin interrupciones. En específico a Pastor Villalpando y Emilio Peña, que de manera directa e indirecta contribuyeron, a través de diferentes discusiones que mantuvimos, a resolver problemas y mantener viva la motivación por seguir investigando y conociendo más de nuestra disciplina.

A los profesores de mi comisión, Fabián Rojas y Sergio Ruiz, por esperar pacientemente en aquellos años que fui dirigente estudiantil y los avances de tesis aparecían con mucha suerte una vez al semestre.

Porque el trabajo de la memoria corresponde a un hito de culminación dentro de un proceso más grande, complejo e integral, agradezco a quienes contribuyeron a dar dirección acertada en él de diferentes formas. A José Luis Caroca, por mostrarme qué significa el rigor académico y su importancia. A Miguel Ángel Bravo, por ser aquel hermano mayor que nunca tuve durante un periodo breve pero intenso de mi vida universitaria. Al profesor Rodolfo Saragoni, quién fue el primero que me mostró con humildad lo que significa hacer ciencia dentro de la Ingeniería Sísmica. Fue el mismo profesor, que de manera pedagógica y desde su infinita sencillez, nos enseñó a perder la soberbia sobre lo que se conoce, separando la compleja realidad como fenómeno del precario conocimiento que tenemos de ella.

Finalmente, a mis compañeros del Movimiento Estudiantil, por mantener viva la llama de los necesarios cambios que requiere nuestro país y que alimenta nuestros espíritus.

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Objetivo principal	3
1.1.2. Objetivos específicos	3
1.2. Organización y alcances	4
2. Ingeniería sísmica del proceso de ruptura chileno	5
2.1. Evaluación de la sismicidad	6
2.2. Principales terremotos registrados	9
2.3. Norma chilena oficial NCh 433.Of1996 modificada en 2012: diseño sísmico de edificios	10
3. Base de datos	13
3.1. Acceso a registros de aceleraciones y catálogos	14
3.2. Organización de la información	15
3.3. Criterios de selección	16
3.4. Procesamiento de señales	26
3.4.1. Selección de límite de periodo largo y frecuencia esquina filtro pasa alto	29
3.4.2. Selección de límite de periodo corto y frecuencia esquina filtro pasa bajo	33
3.5. Muestra de contenido final	40
4. Distancias a la fuente sísmica	42
4.1. Modelos de ruptura de falla finita	44
4.2. Modelos de asperezas: áreas de grandes deslizamientos	45
4.3. Distancia más cercana a la fuente sísmica extendida	51
5. Efectos de sitio y clasificaciones	60
5.1. Evaluación de la amplificación dinámica	61
5.1.1. Determinación de periodos predominantes	64
5.2. Clasificaciones de suelos	66
5.2.1. Primera clasificación: periodo predominante T^*	66
5.2.2. Segunda clasificación: forma y amplitud de las razones espectrales H/V	70
5.3. Factores de amplificación dinámica	73
5.3.1. V_{S30} como indicador del nivel de amplificación	81
5.4. Comentarios respecto a la norma chilena oficial NCh 433.Of1996 modificada en 2012	85

5.5. Conclusiones	86
6. Curvas de atenuación de aceleraciones y desplazamientos espectrales para un 5% de amortiguamiento, PGA y PGD	90
6.1. Datos de regresiones	91
6.2. Modelo de atenuación y funciones	92
6.2.1. Características de la fuente sísmica F_F	93
6.2.2. Trayectoria fuente-sitio F_D	95
6.2.3. Efectos de sitio F_S	96
6.3. Procedimiento de inversión y residuos	96
6.4. Evaluación de resultados	103
6.4.1. Comparación con otros estudios	112
6.4.2. Evaluación del desplazamiento	118
6.4.3. Consideraciones respecto a la determinación del peligro sísmico en zonas de subducción	119
6.5. Conclusiones	120
7. Conclusiones y recomendaciones	123
7.1. Recomendaciones para desarrollos futuros	126
Bibliografía	128
A. Información de registros, eventos y estaciones	137
A.1. Catálogo de eventos	137
A.2. Catálogo de estaciones sísmicas	141
A.3. Información de procesamiento de registros	148
B. Factores de amplificación para las estaciones sísmicas utilizadas	168
B.1. Razones espectrales H/V de estaciones sísmicas	168
C. Operaciones básicas de la base de datos	195
C.1. Agregar nuevos registros de aceleraciones	195
C.2. Procesar registros de aceleraciones	196

Índice de tablas

3.1.	Definiciones de los objetos utilizados para el cálculo y almacenamiento de parámetros.	17
3.2.	Definición y descripción de propiedades del objeto <i>canal</i>	18
3.3.	Definición y descripción de propiedades del objeto <i>estacion</i>	18
3.4.	Definición y descripción de propiedades del objeto <i>evento</i>	19
3.5.	Definición y descripción de propiedades del objeto <i>output</i>	20
3.6.	Valores de frecuencias de corte para filtros pasa altos indicadas para cada instrumento en función de sus características.	32
3.7.	Resumen de los pasos utilizados para procesar la base de datos de registros de aceleración de terremotos chilenos.	40
4.1.	Modelos de falla finita para el terremoto del Maule 2010.	46
4.2.	Modelo de falla finita para el terremoto de Tocopilla 2007.	46
4.3.	Estudios de fuentes sísmicas para los principales terremotos interplaca chilenos registrados.	47
4.4.	Modelos propuestos de áreas de ruptura.	47
4.5.	Modelos propuestos de asperezas: áreas de grandes deslizamientos.	52
4.6.	Definición y descripción de propiedades del objeto <i>modeloff</i>	57
4.7.	Definición y descripción de propiedades del objeto <i>distancia</i>	58
5.1.	Descripción de la clasificación de sitios en función de T^* y la cantidad de estaciones sísmicas de cada categoría.	68
5.2.	Descripción de la clasificación respecto a la forma y amplitud de las razones espectrales H/V la cantidad de estaciones sísmicas de cada categoría.	71
5.3.	Detalle de las cantidades de estaciones sísmicas en las dos clasificaciones propuestas.	71
5.4.	Detalle del cálculo de los valores de n_2 y n_4 para cada iteración. Se incluyen los valores finales medios ponderados.	76
5.5.	Discretización de valores del coeficiente de corrección n en función de la segunda clasificación.	76
5.6.	Factores promedio de amplificación dinámica μ_o relativos al movimiento sobre un afloramiento rocoso para las clases definidas respecto al periodo predominante T^*	77
6.1.	Definición de los valores de distancia-sitio máximos utilizados en las regresiones, en función de la magnitud M_w y el tipo de terremoto.	92

6.2.	Valores asociados al término de saturación R_o para distancias cercanas a la fuente.	95
6.3.	Valores asociados al término representativo del <i>geométrical spreading</i>	96
6.4.	Coefficientes de forma para la amplificación dinámica en función del periodo predominante del suelo	97
6.5.	Asignación de coeficientes de forma de la amplificación en función del periodo predominante.	97
6.6.	Desviación estándar y coeficientes asociados a la función de trayectoria fuente-sitio F_D obtenidos a partir de la inversión de la primera etapa.	99
6.7.	Desviación estándar y coeficientes asociados a la función de fuente sísmica F_F obtenidos a partir de la inversión de la segunda etapa. Se incluye además la desviación estándar del procedimiento completo σ_t	104
6.8.	Resumen del procedimiento de inversión utilizado.	106
A.1.	Información general de los terremotos asociados a los registros de aceleraciones.	137
A.1.	— Continuación.	138
A.1.	— Continuación.	139
A.1.	— Continuación.	140
A.1.	— Continuación.	141
A.2.	Información general de las estaciones asociadas a los registros de aceleraciones.	142
A.2.	— Continuación.	143
A.2.	— Continuación.	144
A.2.	— Continuación.	145
A.2.	— Continuación.	146
A.2.	— Continuación.	147
A.3.	Frecuencias de esquina utilizadas en la aplicación de filtros para cada componente de los registros de aceleraciones. Se indican además los límites de uso de los espectros de respuesta a 5 % de amortiguamiento.	149
A.3.	— Continuación.	150
A.3.	— Continuación.	151
A.3.	— Continuación.	152
A.3.	— Continuación.	153
A.3.	— Continuación.	154
A.3.	— Continuación.	155
A.3.	— Continuación.	156
A.3.	— Continuación.	157
A.3.	— Continuación.	158
A.3.	— Continuación.	159
A.3.	— Continuación.	160
A.3.	— Continuación.	161
A.3.	— Continuación.	162
A.3.	— Continuación.	163
A.3.	— Continuación.	164
A.3.	— Continuación.	165
A.3.	— Continuación.	166
A.3.	— Continuación.	167

Índice de figuras

2.1.	Representación de los diferentes mecanismos de generación de sismos en el contacto entre las placas Nazca y Sudamericana. La zona 1 corresponde a eventos <i>outer-rise</i> , la zona 2 a interplaca, la zona 3 a intra placa y las zonas 4 a superficiales o corticales.	7
2.2.	Evaluación de la sismicidad de la zona de subducción chilena. Se muestran los eventos utilizados en este estudio y su distribución en planta, separados por M_w y profundidad.	8
2.3.	Espectros lineales elásticos de los sitios de la clasificación de suelos de la norma chilena oficial [Ins] para una zona III.	11
2.4.	Factor de forma espectral de la clasificación de suelos de la norma chilena oficial [Ins].	12
3.1.	Diagrama de funcionalidades de los objetos que representan la base de datos.	16
3.2.	Zona norte I: ubicación de estaciones sísmicas pertenecientes a la base de datos.	22
3.3.	Zona norte II: ubicación de estaciones sísmicas pertenecientes a la base de datos.	23
3.4.	Zona centro: ubicación de estaciones sísmicas pertenecientes a la base de datos.	24
3.5.	Zona sur: ubicación de estaciones sísmicas pertenecientes a la base de datos.	25
3.6.	(a) Función de transferencia teórica de un oscilador de 1 grado de libertad amortiguado con frecuencia natural de 1 [Hz] y 5 % de amortiguamiento crítico. (b) Variaciones de la respuesta dinámica teórica de un instrumento análogo con frecuencia natural de 25 [Hz] y 60 % de amortiguamiento crítico respecto a diferentes procesamientos.	27
3.7.	Comparación de los filtros diseñados por la función <i>butter</i> y <i>filtfilt</i> de MATLAB y la aplicación directa de sus definiciones en el espacio de la frecuencia. (a) La diferencia entre usar el algoritmo interno de <i>butter</i> para pasa banda versus la idea de utilizar secuencialmente un filtro highpass y lowpass. (b) La comparación de los decaimientos de lo anterior con los teóricos para filtros acausales.	29
3.8.	Verificación de la remoción de ruido de baja frecuencia considerando la eliminación de líneas base y la aplicación de un filtro pasa alto. El registro de aceleración corresponde al terremoto de Tocopilla 2007 obtenido en la estación MEJI. Las series de tiempo de velocidad y desplazamiento se obtienen integrando la aceleración una y dos veces respectivamente.	30
3.9.	Ventana <i>Tukey</i> o coseno <i>tapper</i> con un 50 % de longitud respecto a la duración de la señal.	31

3.10. (a) Espectros de respuesta de desplazamiento a un 5% de amortiguamiento obtenidos de un registro de aceleraciones doblemente integrado que ha sido procesado de dos diferentes maneras. La línea vertical representa el límite de periodo largo para el espectro de respuesta de aceleraciones (13.5 [s] en este ejemplo). (b) Espectros de amplitud de Fourier del mismo registro de aceleraciones. Para ambas figuras se utiliza el registro de aceleraciones del terremoto de Tocopilla 2007 obtenido en la estación MEJI.	33
3.11. Pérdida de PGA al utilizar filtros pasa bajo de diferente orden N y distintas frecuencias de esquina f_c en la componente NS de los registros de aceleraciones del terremoto de Tocopilla 2007 en las estaciones (a) TOCP y (b) MEJI. El efecto se mide respecto al PGA del registro sin filtrar (PGA_{nomean}).	35
3.12. Espectro de amplitud de Fourier (FAS) del registro de aceleraciones sin filtrar para la estación (a) TOCP y (b) MEJI.	36
3.13. Efecto sobre el espectro de respuesta de aceleraciones (SA) para diferentes frecuencias: Comparación de efectos de filtros de diferentes límites altos sobre el valor del SA para 100, 70, 50 y 20 [Hz]. El registro corresponde a la componente NS de TOCP para el terremoto de Tocopilla 2007.	37
3.14. Distancias al hipocentro versus PGA para eventos intraplaca agrupados por su magnitud.	38
3.15. Distancias al hipocentro versus PGA para eventos interplaca <i>trust</i> agrupados por su magnitud.	39
3.16. Distancias al hipocentro versus PGA para eventos (a) intraplaca y (b) interplaca para diferentes rangos de magnitud M_w	41
3.17. Descripción general de los datos procesados de terremotos interplaca e intraplaca en función de la magnitud y la distancia hipocentral.	41
4.1. Esquema de las definiciones de diferentes distancias utilizadas en ingeniería sísmica [Boo].	43
4.2. Esquema de las coordenadas utilizadas para describir los modelos de falla finita. Se muestra el rumbo (ϕ), el manteo (δ), la profundidad de la esquina inferior izquierda (H_{top}), además del largo (L) y ancho (W) del área de ruptura.	45
4.3. Área de ruptura propuesta para el terremoto de Chile Central 1985.	46
4.4. Área de ruptura propuesta para el terremoto de Antofagasta 1995.	48
4.5. Área de ruptura propuesta para el terremoto de Tocopilla 2007.	49
4.6. Área de ruptura propuesta para el terremoto del Maule 2010.	50
4.7. Área de ruptura propuesta para el terremoto de Iquique 2014 y su réplica del 3 de abril.	51
4.8. Áreas de asperezas de deslizamiento propuestas para el terremoto de Chile Central 1985.	52
4.9. Área de aspereza de deslizamiento propuesta para el terremoto de Antofagasta 1995.	53
4.10. Áreas de asperezas de deslizamiento propuestas para el terremoto de Tocopilla 2007.	54
4.11. Áreas de asperezas de deslizamiento propuestas para el terremoto del Maule 2010.	55
4.12. Área de aspereza de deslizamiento propuesta para el terremoto de Iquique 2014 y su réplica del 3 de abril.	56

4.13.	Distancias al área de ruptura versus PGA para eventos interplaca <i>trust</i> agrupados por su magnitud.	58
4.14.	Distancia más cercana al área de una aspereza de deslizamiento versus PGA para eventos interplaca <i>trust</i> agrupados por su magnitud.	59
5.1.	Funciones de transferencia teóricas [PKHR12] para osciladores de 1 GDL, bajo diferentes niveles de amortiguamiento β y frecuencia natural f_n . Las frecuencias bajas no se ven afectadas si f_n es suficientemente alta. La mayor amplificación se produce en f_n , cuya amplitud depende de β . Las frecuencias altas se ven disminuidas.	62
5.2.	Razones espectrales H/V de diferentes estaciones sísmicas. La línea gruesa indica el valor de la media aritmética, con el periodo predominante del suelo marcado en un círculo.	67
5.3.	Indicadores estadísticos de la clasificación de suelos propuesta en función de T^* : (a) media aritmética y (b) desviación estándar del total de datos asociados a cada clase.	69
5.4.	Distribución de la clasificación en base a T^* sobre datos de PGA para diferentes rangos de magnitud de sismos chilenos interplaca.	70
5.5.	Parámetros estadísticos de la clasificación de suelos propuesta en función de la forma y amplitud máxima de las razones espectrales H/V: (a) media aritmética y (b) desviación estándar del total de datos asociados a cada clase.	72
5.6.	Distribución de la clasificación en base a la forma y amplitud máxima de relaciones espectrales H/V sobre datos de PGA para diferentes rangos de magnitud de sismos chilenos interplaca.	73
5.7.	Factores promedio de amplificación dinámica para cada clasificación respecto a la (a) clase I y a la (b) clase 1.	74
5.8.	Determinación de los coeficientes n_2 y n_4 para las clases II, III, IV y V. La línea gruesa representa la media de las razones H/V (μ_o) de las estaciones asociadas a la clase respectiva II, III, IV y V. Las líneas sólidas delgadas representan las medias de las razones H/V de las estaciones con clase 4 (línea sólida delgada superior) y clase 2 (línea sólida delgada inferior) respectivas a cada clase II, III, IV y V. Las líneas punteadas representan el valor de μ_o elevado a la potencia de n_2 y n_4 , utilizando los valores de la Tabla (5.4).	78
5.9.	Factores promedio de amplificación dinámica μ_o relativos al movimiento sobre un afloramiento rocoso para las clases definidas respecto al periodo predominante T^* . Se ha aplicado un suavizado y una corrección del sesgo en periodos largos.	79
5.10.	Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5 % de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.	80
5.11.	Factores de amplificación lineal para <i>Boore y Atkinson</i> [BA08] evaluados para diferentes valores de V_{S30}	81
5.12.	Relación entre el parámetro n y V_{S30} . Los puntos negros representan las estaciones con valores de V_{S30} disponibles. Los rectángulos rojos son promedios ponderados cada 10 estaciones ordenadas de menor a mayor según su valor de V_{S30} . La curva azul representa el ajuste por mínimos cuadrados del modelo de la Ecuación (5.13).	83

5.13. (a) Valores máximos de las razones espectrales H/V medias de cada estación versus el periodo predominante identificado. Han sido agrupadas según la segunda clasificación, no incluyendo las de clase 1. Símbolos de color sólido más grandes indican valores relativos más bajos de V_{S30} . Símbolos de relleno blanco y acompañados de una cruz indican estaciones sísmicas sin V_{S30} conocido. (b) Normalización a clase 3 de los valores máximos de las razones espectrales H/V medias según el valor n asociado a la clasificación de cada estación y la Tabla (5.5).	88
5.14. (a) Valores máximos de las razones espectrales H/V medias de cada estación versus V_{S30} . Se han incluido únicamente estaciones con V_{S30} conocidos. Han sido agrupadas según la segunda clasificación, no incluyendo las de clase 1. (b) Normalización a clase 3 de los valores máximos de las razones espectrales H/V medias según el valor n determinado por el modelo (5.13).	89
6.1. Cantidad de datos disponibles en función del periodo de la regresión.	92
6.2. Muestra de los datos utilizados en las regresiones finales después de aplicar un corte por distancia en función de M_w . (a) Registros de aceleraciones disponibles para las regresiones de alta frecuencia y PGA, (b) registros de aceleraciones disponibles para la regresión de 10 [s].	93
6.3. Representación de las causas del movimiento superficial por la acción de un sismo interplaca o intraplaca. F_F corresponde al modelo que cuantifica el aporte de la fuente sísmica, F_D el aporte según la distancia fuente-sitio y F_S el aporte debido a la amplificación dinámica del suelo en los últimos metros de la trayectoria.	94
6.4. Residuos de la regresión de PGA en función de la profundidad focal.	94
6.5. Residuos obtenidos en la primera etapa del procedimiento de inversión en función de la distancia de la fuente sísmica al sitio y agrupados en rangos de M_w	100
6.6. Residuos obtenidos en la primera etapa del procedimiento de inversión en función de la distancia de la fuente sísmica al sitio y agrupados por tipo de suelo definido según T^*	101
6.7. Evaluación de la función F_F utilizando los resultados de la segunda etapa de inversión. Los círculos y cuadrados representan los datos \hat{F}_F para sismos interplaca e intraplaca respectivamente obtenidos de la primera etapa de inversión.	105
6.8. Evaluación de curvas de atenuación interplaca para diferentes magnitudes y periodos, considerando un sitio tipo roca. La curva sólida gruesa corresponde a $M_w = 8.0$, la sólida delgada a $M_w = 7.0$ y la segmentada a $M_w = 6.0$	107
6.9. Evaluación de curvas de atenuación intraplaca para diferentes magnitudes y periodos, considerando un sitio tipo roca. La curva sólida gruesa corresponde a $M_w = 8.0$, la sólida delgada a $M_w = 7.0$ y la segmentada a $M_w = 6.0$	108
6.10. Variación de las curvas de atenuación de terremotos interplaca e intraplaca respecto a diferentes tipos de suelo clasificados según el periodo predominante T^* . Se ha considerado un valor de $V_{S30} = 400$ [m/s] para todos los casos. Para la curva de terremotos interplaca se considera $M_w = 8.5$, mientras que para la curva de terremotos intraplaca $M_w = 7.5$	109

6.11.	Forma espectral de la evaluación de las curvas de atenuación de terremotos interplaca, utilizando diferentes magnitudes y distancias de la fuente sísmica al sitio. Se considera un suelo tipo roca en todos los casos y cuatro casos de distancia constante y magnitud variable.	110
6.12.	Forma espectral de la evaluación de las curvas de atenuación de terremotos interplaca, utilizando diferentes magnitudes y distancias de la fuente sísmica al sitio. Se considera un suelo tipo roca en todos los casos y cuatro casos de magnitud constante y distancia variable.	111
6.13.	Evaluación espectral de las curvas de atenuación para terremotos (a) interplaca y (b) intraplaca en función de la clasificación del sitio según su periodo dominante T^*	112
6.14.	Evaluación de diferentes curvas de atenuación para terremotos interplaca en diferentes periodos y PGA. Se considera una fuente de $M_w = 8.8$ y $H = 28.1$ [km] correspondiente a las características del sismo del Maule 2010	113
6.15.	Evaluación de diferentes curvas de atenuación para terremotos intraplaca en diferentes periodos y PGA. Se considera una fuente de $M_w = 7.8$ y $H = 105.5$ [km] correspondiente a las características del sismo de Tarapacá 2005	115
6.16.	Comparación de diferentes predicciones de aceleraciones espectrales para los terremotos interplaca Iquique 2014 y Maule 2014 considerando diferentes tipos de suelo y distancias.	117
6.17.	Comparación de diferentes predicciones de aceleraciones espectrales para los terremotos intraplaca Tarapacá 2005 y Punitaqui 1997 considerando diferentes tipos de suelo y distancias.	118
6.18.	(a) Curvas de atenuación de desplazamientos para eventos interplaca de diferentes magnitudes, considerando la respuesta de un oscilador de 0.75 [s] de periodo fundamental y 5 % de amortiguamiento. (b) Pseudo espectros de respuesta de desplazamiento para diferentes distancias a la fuente sísmica de un evento interplaca $M_w = 8.8$. En ambos casos se considera un sitio tipo roca.	119
B.1.	Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5 % de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.	169
B.2.	Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5 % de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.	170
B.3.	Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5 % de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.	171
B.4.	Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5 % de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.	172
B.5.	Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5 % de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.	173
B.6.	Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5 % de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.	174

B.22. Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5 % de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.	190
B.23. Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5 % de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.	191
B.24. Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5 % de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.	192
B.25. Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5 % de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.	193
B.26. Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5 % de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.	194

Capítulo 1

Introducción

El 27 de febrero de 2010 a las 03:34 hora local, el territorio chileno fue remecido por un violento sismo $M_w = 8.8$ en la zona sur del país, que junto al posterior tsunami, costó la vida a más de 500 personas [dIP]. Cuatro años más tarde, el 1 de abril de 2014 a las 20:46 hora local, otro evento importante ($M_w = 8.2$) generó diversos daños humanos y materiales en las cercanías de la ciudad de Iquique. Más recientemente, el 16 de septiembre de 2015, un nuevo sismo de magnitud $M_w = 8.4$ remeció la región de Coquimbo. Cada uno de estos tres eventos sísmicos, separados por tan sólo 5 años, ocupa un lugar importante dentro de los terremotos de mayor liberación de energía del mundo y forman parte de la actividad sísmica característica de las zonas de subducción.

Uno de los objetivos de la ingeniería sísmica consiste en desarrollar modelos que permitan predecir la intensidad del movimiento superficial asociado a las características específicas de los terremotos. Estos modelos reciben el nombre de curvas de atenuación (GMPEs: *ground motion prediction equations*). Por lo general, para predecir los valores máximos de aceleración (PGA) y en algunos también valores máximos de desplazamiento (PGD) y velocidad (PGV) [PCA⁺08], utilizan una serie de parámetros básicos que describen el terremoto, las características del suelo del lugar donde se desea realizar la estimación y la distancia entre el terremoto y el sitio. Adicionalmente, la mayoría de los estudios recientes, permiten obtener los valores del espectro de respuesta de aceleraciones con 5% de amortiguamiento crítico.

Para ejemplificar su utilidad, se describen dos de sus aplicaciones directas. La primera corresponde a estimar a partir de los primeros datos que se conocen en los minutos posteriores a la ocurrencia de un terremoto importante, la extensión y la localización de las zonas más afectadas. Utilizando las predicciones realizadas por un modelo GMPE, programas computacionales como ShakeMap permiten generar mapas de intensidad del movimiento superficial para un evento sísmico que acaba de ocurrir. ShakeMap utiliza un procedimiento automatizado, y se puede programar para que la publicación de sus resultados se realice en tiempo real en un sitio web de reporte sísmico o para dotar de mejor información a las diferentes instituciones de protección civil involucradas en organizar la respuesta ante el desastre. La segunda aplicación de los GMPEs es la determinación del peligro sísmico y de la demanda sísmica esperada tanto para el diseño estructural específico de una obra como para la definición de los códigos de diseño sísmico generales propios de cada país.

Debido a que los modelos de GMPEs se derivan empíricamente, un punto clave para la obtención de buenos resultados está determinada por la calidad y cantidad de datos disponibles de registros de movimiento generados por terremotos. Debido a que en la mayoría de los casos, los terremotos de mayores magnitudes se generan cada cientos años, la disponibilidad de observaciones que sean representativas de todos los fenómenos posibles es limitada. Como forma de ejemplificar esta afirmación, para la zona de subducción chilena se tiene conocimiento de la ocurrencia de grandes terremotos desde hace cientos de años por medio de datos paleontológicos [CEL⁺86]. Sin embargo, uno de los primeros registros análogos de aceleraciones obtenidos mientras la superficie está en movimiento corresponden al terremoto de Valparaíso 1985 $M_w = 8.0$. Esta situación, que se repite en todas las regiones de subducción del mundo, se ve mitigada en parte para las regiones de Chile y Japón, donde las velocidades de desplazamiento relativo entre las placas que chocan es mayor, lo que produce una sismicidad más intensa y mayores oportunidades de obtener datos.

Recopilada la información disponible y procesada de tal forma de identificar su contenido útil, se pueden utilizar diferentes estimadores matemáticos para representar el modelo GMPE, que básicamente dependen de los fenómenos identificables en la forma que adquiere la base de datos. Pocos datos con una pobre distribución respecto a sus parámetros asociados (magnitud, profundidad, distancia del evento al sitio, etc), serán mejor ajustados por modelos simples, mientras que bases de datos más completas, con amplios rangos de parámetros descriptivos, permiten utilizar modelos más complejos que describen un mayor número de fenómenos. Sin embargo, independiente de su complejidad, la predicción de un modelo GMPE se puede dividir en tres submodelos que se superponen: uno para la fuente sísmica, otro para los efectos locales del sitio donde se ubica la estación sísmica y otro para medir la trayectoria desde la fuente sísmica hasta el sitio de la observación [BA08]. Las fuentes sísmicas se miden en la mayoría de los casos utilizando la magnitud momento M_w y considerando que para diferentes tipos de terremotos, el efecto de las variaciones de M_w sobre el movimiento superficial puede ser diferente. En la zona de subducción chilena, los tipos de terremotos más frecuentes son los intraplaca y los interplaca (números 2 y 3 de la Figura 2.1). Si bien para los primeros, se puede considerar que la fuente sísmica se concentra en un punto definido por el hipocentro del evento [YCSH97, AB03a, ZZA⁺06, AGA15], esta consideración genera importantes errores en las estimaciones si se asume también para eventos interplaca. Terremotos como el del Maule 2010, Illapel 2015, Iquique 2014 o Chile central 1985, corresponden a este último tipo, los que poseen grandes áreas de ruptura desde la cual se emiten ondas de movimiento. En estos casos, es usual utilizar definiciones de fuentes sísmicas extendidas en un área finita.

Finalmente, existen diferentes enfoques para evaluar los efectos locales que genera la diversidad de características dinámicas posibles de los suelos bajo los sitios donde se quiere predecir el movimiento superficial. El primero de ellos, asociado a la larga tradición sísmica de la ingeniería sísmica japonesa, agrupa las diferentes características de los suelos según su periodo fundamental de vibración (T_o) [ZIZ⁺04, FBSD07, ABB⁺12]. Por otro lado, la ingeniería sísmica europea y norteamericana han avanzado hacia utilizar un parámetro diferente: la velocidad de onda de corte promedio sobre las mediciones de los primeros 30 metros de profundidad (V_{S30}) [DBC⁺00, AB03a, CS05, ABA⁺12, AGA15].

A partir de los nuevos registros de aceleración obtenidos de los recientes terremotos chilenos de gran magnitud ($M_w \geq 8.2$), considerando recientes técnicas para el procesa-

miento de registros de aceleraciones en el campo de la ingeniería sísmica y la sismología [BB05, DB11, BG14], proponiendo modelos de falla finita para los principales terremotos interplaca chilenos de los cuales se tienen registros disponibles y derivando un modelo empírico de amplificación dinámica de suelos que permite evaluar la capacidad de amplificación de un suelo a partir de su periodo dominante T^* y V_{S30} utilizados de manera combinada, en esta tesis se construye un modelo de atenuación de aceleraciones y pseudodesplazamientos o GMPE para terremotos interplaca e intraplaca chilenos. Se revisan a partir de sus resultados los comentarios realizados por *Stewart et al.* [SDJ⁺15] respecto a las diferencias de atenuación de terremotos de Chile y Japón, además de las diferencias de atenuación de terremotos interplaca e intraplaca reportadas por *Youngs et al.* [YCSH97] a partir de una base de datos de terremotos de otras regiones de subducción. Finalmente, como forma de validación, se comparan las predicciones espectrales con espectros de respuesta de registros de aceleraciones de terremotos chilenos.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo principal

A partir de la inversión de diferentes parámetros que describen los efectos de terremotos chilenos en la superficie, el objetivo de esta tesis es desarrollar un modelo de atenuación de aceleraciones y desplazamientos máximos horizontales, y valores de aceleraciones y pseudo desplazamientos máximos espectrales para osciladores de un 5% de amortiguamiento y periodos que van desde 0.01 [s] a 10 [s].

1.1.2. Objetivos específicos

- (a) Compilar los registros existentes de las redes de acelerógrafos del Departamento de Ingeniería Civil (RENADIC) y el Centro Sismológico Nacional (CSN) de la Universidad de Chile en una sola gran base de datos de terremotos chilenos. A partir de ella, realizar cálculos de parámetros descriptivos de los efectos en superficie de sus terremotos asociados.
- (b) Dentro de los parámetros mencionados, construir una medida de la distancia desde el sitio de obtención del registro a un modelo de fuente sísmica de asperezas.
- (c) Generar una clasificación de suelos que permita aislar el efecto de sitio en la medición de aceleraciones máximas de registros de terremotos chilenos.
- (d) Validar los resultados de las curvas de atenuación a partir de su nivel de ajuste a las observaciones y su comparación con trabajos anteriores.

1.2. Organización y alcances

En el capítulo 2 se describen los principales aspectos teóricos que explican el proceso de ruptura de los terremotos chilenos, asociado al contacto entre la placa Nazca y la placa Sudamericana. Además, se muestra a través de algunos ejemplos, las características de la sismicidad observada en esta región de subducción.

En el capítulo 3 se detalla el proceso de selección y procesamiento de los registros de aceleraciones de terremotos chilenos. Se muestra la ubicación de las estaciones sísmicas y se describen de forma general los datos disponibles para utilizar en este estudio, organizados y compilados en una base de datos.

En el capítulo 4 se calculan las distancias de los sitios de las estaciones a diferentes modelos de fuente sísmica finita extendida. Se analizan sus efectos en la atenuación logarítmica del PGA entre la distancia hipocentral y la distancia más cercana a un punto del área de ruptura o a un punto del área asociada a la aspereza más cercana, definidas como zonas de concentración de deslizamientos máximos.

En el capítulo 5 se estudian los efectos de sitio relacionados con las localizaciones de las estaciones sísmicas que registran los datos del capítulo 3. Se realizan dos clasificaciones de los tipos de suelos de ellas utilizando la razón media de los espectros de respuesta horizontal sobre vertical (H/V) obtenida a partir de los registros de terremotos: forma y amplitud de la amplificación dinámica asociada al sitio de la localización. Posteriormente se proponen factores empíricos para modelar la amplificación de un sitio cualquiera en función de su periodo predominante T^* y la velocidad de corte representativa de los primeros 30 metros de profundidad V_{S30} .

En el capítulo 6 se realiza la inversión de máxima verosimilitud para los parámetros de un modelo que describa la atenuación del PGA horizontal y las amplitudes del espectro de respuesta de aceleraciones y desplazamiento para osciladores de 5% de amortiguamiento y periodos que van desde 0.01 [s] hasta 10 [s], en un procedimiento de dos etapas. Se analizan los residuos en cada una de ellas y se compara la forma general de las curvas obtenidas con otros estudios anteriores. Adicionalmente, se analizan diferencias regionales de la atenuación de los terremotos chilenos con los de Japón, además de las diferencias de atenuación entre eventos interplaca e intraplaca.

En el capítulo 7 se presentan las principales conclusiones tanto para cada uno de los capítulos anteriores en específico, como para el trabajo en general. Además, se dejan planteadas discusiones y temas desde los cuales es posible orientar futuras investigaciones.

Capítulo 2

Ingeniería sísmica del proceso de ruptura chileno

En este capítulo se describen las características principales de los mecanismos de generación de los eventos asociados a fallas geológicas o rupturas propias del contacto entre placas tectónicas. Si bien a lo largo del territorio chileno se identifican diferentes tipos de contacto¹, el de mayor actividad sísmica corresponde a la subducción de la placa Nazca bajo de la placa Sudamericana, que es el único abordado en este estudio.

El contacto Nazca-Sudamericana recorre casi toda la costa del pacífico de América del Sur, desde la línea ecuatorial aproximadamente hasta la latitud -45°S . Es responsable de la generación de una fosa oceánica al oeste próximo de la línea costera y de la cadena montañosa de Los Andes al este. Siendo este régimen tectónico de subducción uno de los más activos del mundo a propósito de la alta frecuencia de eventos de gran tamaño que implican las mayores cantidades de energía sísmica liberada, los mecanismos de génesis son también diversos. La Figura (2.1) muestra un perfil que identifica de forma esquemática cuatro mecanismos de génesis de terremotos asociados al contacto de las placas Nazca-Sudamericana visto desde sur a norte, los cuales se describen a continuación.

- (1) *Outer rise*: Se generan en el inicio de la subducción de la placa Nazca bajo la sudamericana, al oeste de la fosa oceánica vista según la Figura (2.1). Los efectos de estos sismos en la superficie terrestre no constituyen mayor peligro, tanto porque se encuentran suficientemente alejados hacia el océano como porque los registros obtenidos en Chile rara vez sobrepasan magnitudes $M_w = 6.5$.
- (2) Interplaca o de contacto: El empuje permanente de la placa Nazca hacia el este se encuentra con la resistencia de la placa Sudamericana, produciendo entre ambas un contacto trabado por fricción. La mayor parte del tiempo el desplazamiento relativo entre ambas es despreciable, por lo que el contacto acumula energía. Cuando se sobrepasa un cierto nivel de esfuerzo, se produce un deslizamiento relativo entre ambos planos de contacto que inicia la propagación de ondas sísmicas. Este mecanismo es el más frecuente dentro de los eventos registrados en Chile, además de ser el responsable de aquellos grandes

¹Por ejemplo Antártica-Nazca, Antártica-Sudamericana, Sudamericana-Escocesa, etc.

terremotos recientes² sobre magnitudes $M_w = 8.0$.

- (3) Intraplaca: Los hipocentros de este tipo de evento son de mayor profundidad que los de eventos interplaca y se observan con menor frecuencia. Significan rupturas dentro de la placa Nazca, no necesariamente propias al contacto con la placa Sudamericana. Los eventos alcanzan magnitudes M_w intermedias-altas, aunque menores a los mega terremotos interplaca.
- (4) Superficiales o corticales: El permanente ciclo de acumulación y liberación de energía entre el contacto de las placas Nazca y Sudamericana genera una transferencia de esfuerzos hacia toda la corteza. De esta forma, es posible observar fallas geológicas superficiales de diferentes tamaños, niveles de actividad y direcciones de deslizamiento a lo largo de todo el territorio chileno. Si bien por lo general se espera que sus efectos sean locales, producto de su cercanía con la superficie pueden llegar a ser devastadores incluso ante valores de magnitud pequeños.

En cada uno de estos casos, las zonas donde ocurre deslizamiento relativo entre bloques se denomina área de ruptura, y su extensión es proporcional a la magnitud M_w del terremoto.

Para identificar a cuál de los cuatro mecanismos corresponde a un sismo registrado existen diferentes técnicas, donde unas son más certeras que otras. Por ejemplo, utilizando únicamente información de las coordenadas que localizan el hipocentro, latitud, longitud y profundidad, se puede realizar una rápida discriminación con cierto margen de error. Hipocentros ubicados al oeste de la fosa oceánica, o justo sobre ella, pueden considerarse en primera instancia como *outer rise*. Por otro lado, eventos con hipocentros de profundidad entre 15 y 50 [km] aproximadamente pueden considerarse como interplaca, pues la zona de concentración de esfuerzos producto del contacto entre las placas Nazca y Sudamericana posee aquella profundidad. Hipocentros de profundidades mayores a 60 [km] indicarían eventos intraplaca. Eventos de hipocentros con profundidad menores a 10 [km] probablemente correspondan a sismos corticales o superficiales, sobre todo si su ubicación no corresponde con la posición del perfil de subducción.

Si además de la ubicación del hipocentro, se conoce el mecanismo focal o *pelota de playa*, es posible confirmar la primera discriminación y asignar aquellos eventos que se encuentran en las zonas límite entre dos mecanismos. Por ejemplo, eventos interplaca probablemente posean ángulos de manto similares al ángulo de subducción de la placa Nazca y rumbos paralelos a la dirección de la fosa oceánica.

2.1. Evaluación de la sismicidad

Luego de chequear y clasificar manualmente todos los sismos considerados en este estudio, se obtuvo la Figura (2.2), donde se muestra la ubicación de los eventos registrados que se utilizarán en este estudio. En los siguientes capítulos se realiza una descripción más detallada de ellos, sin embargo por ahora permiten mostrar la distribución de la sismicidad generada

²Chile central 1985, Maule 2010, Iquique 2014 e Illapel 2015.

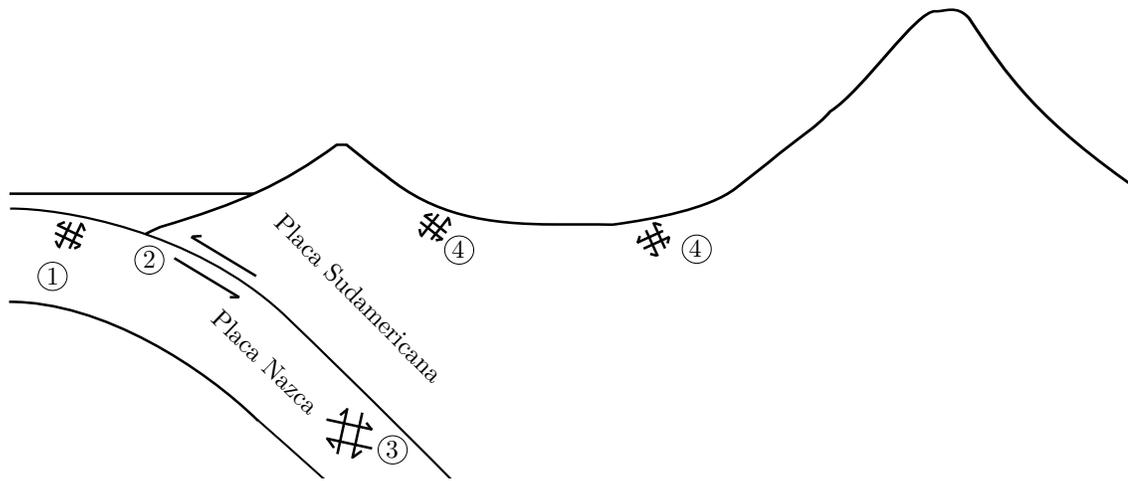


Figura 2.1: Representación de los diferentes mecanismos de generación de sismos en el contacto entre las placas Nazca y Sudamericana. La zona 1 corresponde a eventos *outer-rise*, la zona 2 a interplaca, la zona 3 a intra placa y las zonas 4 a superficiales o corticales.

por la zona de subducción en Chile. Se han descartado los eventos identificados como *outer rise*, que se ubicarían al occidente y sobre la línea negra dentada, que muestra la fosa oceánica. También se han descartado los eventos superficiales, pues al contar con pocos registros, no se consideró posible iniciar una investigación sobre sus características que pudiese arrojar conclusiones representativas de su comportamiento.

Una de las distinciones que hace la Figura (2.2), es la identificación por colores de las profundidades de los hipocentros de cada evento. Es posible identificar claramente una tendencia al aumento de la profundidad hacia el este, comportamiento coherente con el hecho que la sismicidad de eventos interplaca e intraplaca se genera en el contacto entre las placas Nazca-Sudamericana o dentro de la placa Nazca, que se encuentra a profundidades cada vez mayores hacia el este de la fosa oceánica. Por otro lado, la Figura (2.2) también distingue diferentes valores de magnitud M_w , siendo más frecuentes las magnitudes menores, hecho coherente también con la ley de *Guttenberg-Richter*. Cinco estrellas representan la ubicación de los eventos de $M_w \geq 8.0$ registrados, todos de mecanismo interplaca.

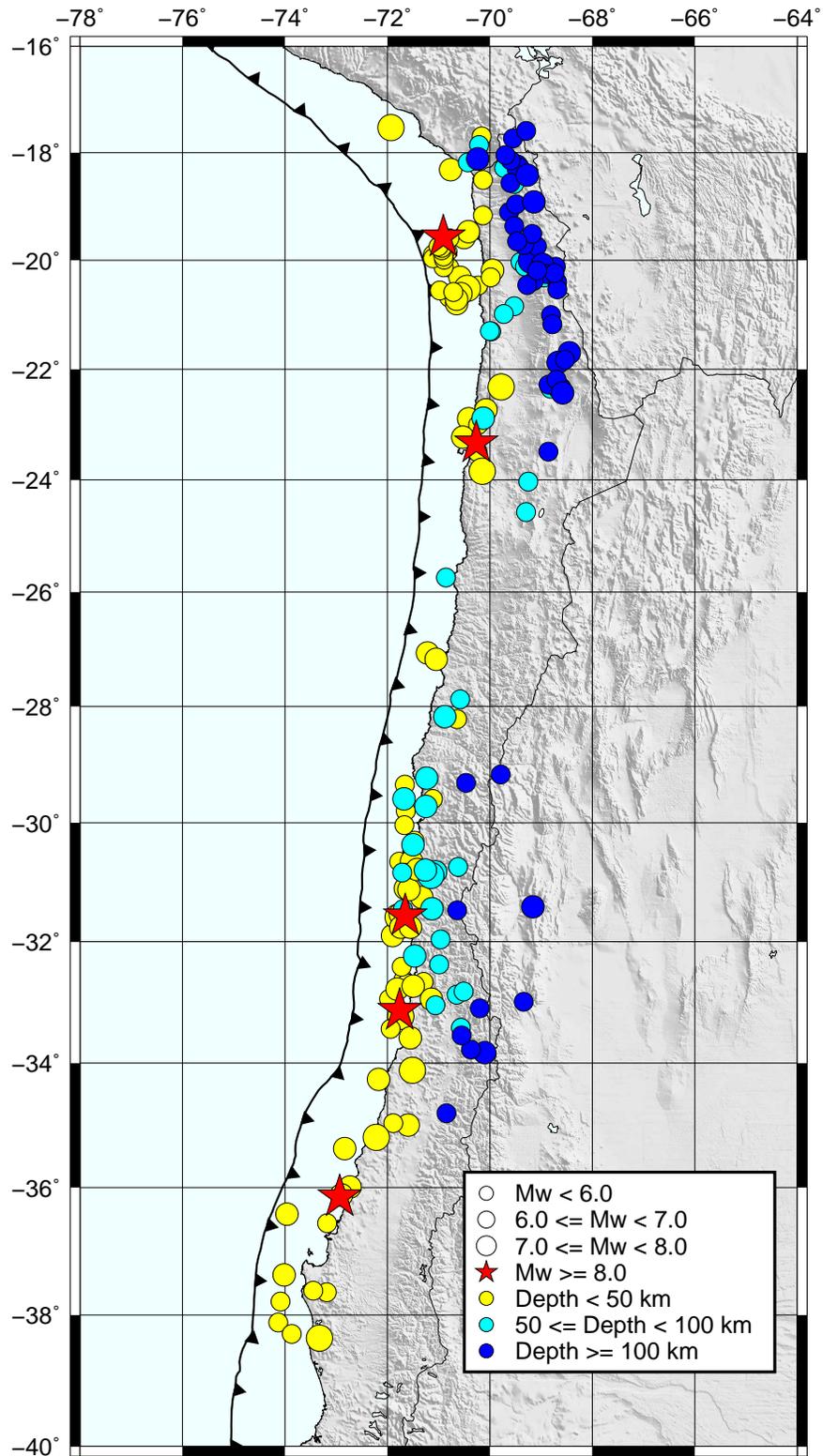


Figura 2.2: Evaluación de la sismicidad de la zona de subducción chilena. Se muestran los eventos utilizados en este estudio y su distribución en planta, separados por M_w y profundidad.

2.2. Principales terremotos registrados

Para Chile los eventos sísmicos de mayores magnitudes M_w registrados por la red RENADIC y la del CSN corresponden a mecanismos interplaca o *thrust*: Chile central 1985, Antofagasta 1995, Maule 2010, Iquique 2014 y Illapel 2015. Estos se caracterizan por poseer largas áreas de ruptura y largas duraciones de movimiento superficial en comparación a otros tipos de mecanismo.

1. **Chile central 1985** $M_w = 8.0$: Evento ocurrido el 3 de marzo de 1985 a las 22:47 GMT, responsable de la muerte de 177 personas y miles de heridos, junto con importantes daños en la región de Valparaíso [CD88]. Su magnitud reportada es $M_w = 8.0$. Este es el primer terremoto chileno en el cual fue posible identificar que además del evento principal, de manera secuencial ocurrieron dos precursores segundos antes [MHM94]. *Mendoza et al.* [MHM94] logra identificar tres fuentes de liberación de energía, cada una con su propio momento sísmico. El evento principal lo ubica a una profundidad aproximada de 40 [km], donde el manteo de la subducción es de 35° . A una misma latitud pero a una profundidad de 22 [km] y manteo de 15° inicia uno de los precursores, mientras que el otro, de menor magnitud se ubica hacia el sur de ambos eventos. En aquel momento existía una red de acelerómetros análogos SMA-1 instalada en la zona central de Chile, que permitió obtener una gran cantidad de registros para la época. Si bien estos datos aún son útiles, se les debe utilizar con precaución en estudios modernos.
2. **Antofagasta 1995** $M_w = 8.0$: El 30 de julio de 1995 ocurre un evento de $M_w = 8.0$ en la región de Antofagasta. Su ruptura se propaga casi completamente desde el norte hacia el sur, en un área de 185×90 [km²] aproximadamente, generando un pequeño tsunami de 2.5 [m] de altura de ola máxima [DMD⁺97]. A pesar de su gran tamaño, sólo se conoce un registro de aceleraciones de este evento.
3. **Maule 2010** $M_w = 8.8$: Este evento, ocurrido el 27 de febrero de 2010, corresponde al de mayor magnitud registrado en Chile desde que existen instrumentos instalados. Su ruptura se propaga en un área total de longitud mayor a 500 [km] en dirección norte y sur. La mayoría de los autores [DNV10, LTS⁺11, TSL⁺10] identifican al menos dos zonas amplias de liberación de energía, siendo la más grande al norte del hipocentro y una más pequeña al sur. Tanto como por el devastador tsunami como por el efecto del terremoto mismo, durante este evento murieron más de 500 personas y se generaron cuantiosos daños en las regiones del Bio Bio, Maule, Metropolitana y de Valparaíso. Si bien existían instrumentos digitales instalados, estos se encontraban en su mayoría en el norte del país, por lo que la gran mayoría de los registros de aceleraciones disponibles fueron registrados por instrumentos análogos SMA-1 y QDR, similares a los del terremoto de 1985.
4. **Iquique 2014** $M_w = 8.2$: Gracias a una extensa red de instrumentos digitales instalados en la zona norte de Chile, autores como *Ruiz et al.* [RMG⁺] han logrado descifrar de forma completa la dinámica del terremoto del 1 de abril de 2014, incluyendo sus eventos previos y posteriores. Con su hipocentro justo frente a las costas de la ciudad de Iquique, se generaron daños importantes en ciertas localizaciones, que hasta la fecha se siguen investigando. Es el terremoto de magnitud mayor a $M_w = 8.0$ mejor registrado

en Chile hasta la fecha.

5. **Illapel 2015** $M_w = 8.3$: El evento más reciente hasta la realización de este estudio ocurrió el 16 de septiembre de 2015 en la región de Coquimbo. Si bien su alta magnitud implicó una gran liberación de energía, los daños observados fueron bajos en proporción a ella, siendo mayores los efectos del tsunami en localidades específicas de la zona. Este evento ocurre relativamente lejos de las grandes concentraciones de población o instalaciones industriales, y además posee una escasa cantidad de registros en comparación a Iquique 2014. Trabajos relativos a la dinámica de ruptura del evento aún no se encuentran disponibles a la fecha de presentación de este estudio.

2.3. Norma chilena oficial NCh 433.Of1996 modificada en 2012: diseño sísmico de edificios

En todo el territorio de Chile el diseño de estructuras de ocupación civil o edificios, que no incorporan puentes, presas, tuneles, acueductos, muelles, canales o obras industriales, se rige por las disposiciones escritas en la norma chilena oficial NCh 433.Of1996 modificada en 2012 [Ins]. Si bien también versa sobre ciertas especificaciones generales para el diseño de algunos elementos, como fundaciones y anclajes, su contenido fundamental se refiere a los métodos de análisis para la evaluación sísmica de estructuras y la cuantificación de su sollicitación. Ésta se entiende como dependiente de las características del sitio en el cual se emplaza el edificio, el desarrollo de comportamiento no lineal de la estructura y el tamaño del terremoto o localización del sitio respecto a la fuente sísmica. Dependiendo de la complejidad del edificio, la normativa permite estimar la demanda sísmica a través del método estático o del análisis modal espectral. Para éste último, dispone de un espectro de aceleraciones como cuantificación de la demanda, que incorpora las tres características mencionadas y se expresa por

$$Sa = \frac{SA_o\alpha}{(R^*/I)} \quad (2.1)$$

Los efectos de sitio, agrupados en una clasificación propia, se describen por los parámetros S y α , donde éste último a su vez corresponde a una función de forma espectral que incorpora el efecto de amplificación dinámica del suelo, por lo que depende del periodo del suelo T_o y un factor p

$$\alpha = \frac{1 + 4.5 \left(\frac{T_n}{T_o}\right)^p}{1 + \left(\frac{T_n}{T_o}\right)^3} \quad (2.2)$$

En el denominador de (2.1), I es un coeficiente que depende de la ocupación o uso de la estructura y R^* el factor de reducción de la sollicitación debida al comportamiento no lineal de ella. Por lo tanto, la demanda sísmica para un caso estructural general corresponde al numerador de (2.1), conocido como *espectro lineal elástico*. En la Figura (2.3) se muestra este espectro calculado para los cinco tipos de suelo que describe la norma. Se considera una zona III, generalmente costera, que corresponde al caso de mayor sollicitación asociado al valor más alto de A_o . Este parámetro corresponde a una estimación del valor máximo efectivo de la

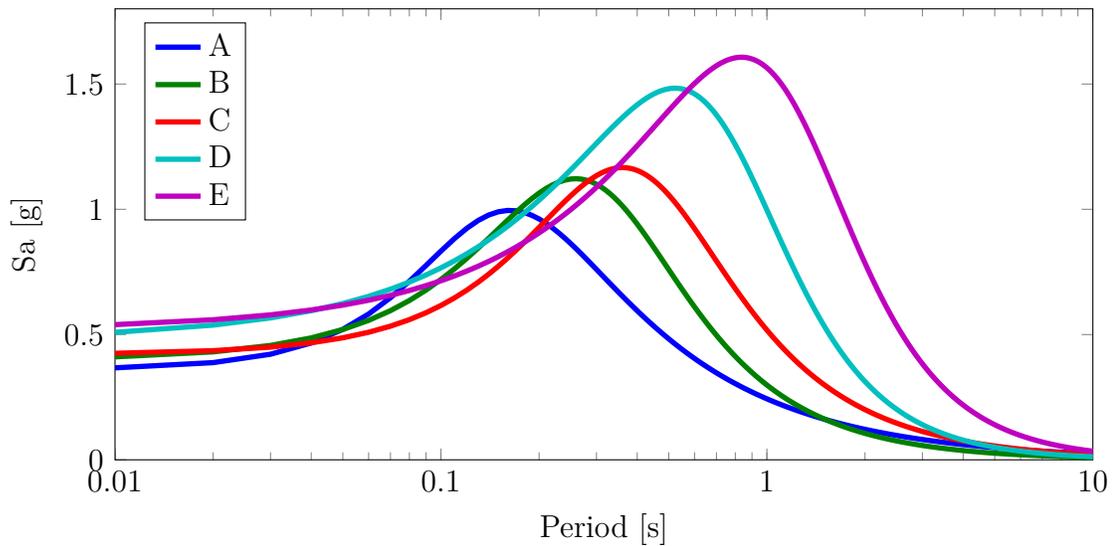


Figura 2.3: Espectros lineales elásticos de los sitios de la clasificación de suelos de la norma chilena oficial [Ins] para una zona III.

aceleración superficial para las características dinámicas de un sitio de referencia y representa el peligro sísmico de la zona en cuestión. En relación a los valores que asume, la tendencia es que a medida que nos alejamos de la costa chilena, éste parámetro disminuye. De manera implícita se realiza una consideración a la cercanía a la fuente sísmica que significa la frontera natural izquierda de Chile: la fosa de subducción de la placa Nazca bajo la Sudamericana. Dicho comportamiento resulta válido siempre y cuando se trate de terremotos interplaca o intraplaca, por lo que la posibilidad de terremotos superficiales es excluída del análisis.

La determinación de estas disposiciones obedece a un largo proceso de discusión y estudio de los sismos chilenos y de un reconocimiento del conocimiento desarrollado en otras regiones de similares características. Inicialmente los coeficientes que determinan la forma de α para cada tipo de suelo, T_o y p , fueron obtenidos a partir de un ajuste a datos de terremotos y suelos de la región de subducción japonesa, ante la escasa información que se tenía de eventos en nuestra región. Dicha elaboración fue validada a posteriori para los datos de terremotos chilenos disponibles en 1993 a la fecha, con buenos resultados. La manera en que escala o cambia el factor de forma espectral α con el periodo natural del suelo T_o , se muestra en la Figura (2.4). En el caso del término S , que crece a medida que el suelo es menos rígido y por tanto con respecto al periodo fundamental que lo define, se determinó en una modificación posterior al terremoto del Maule 2010, junto con la adición del sitio C antes no existente.

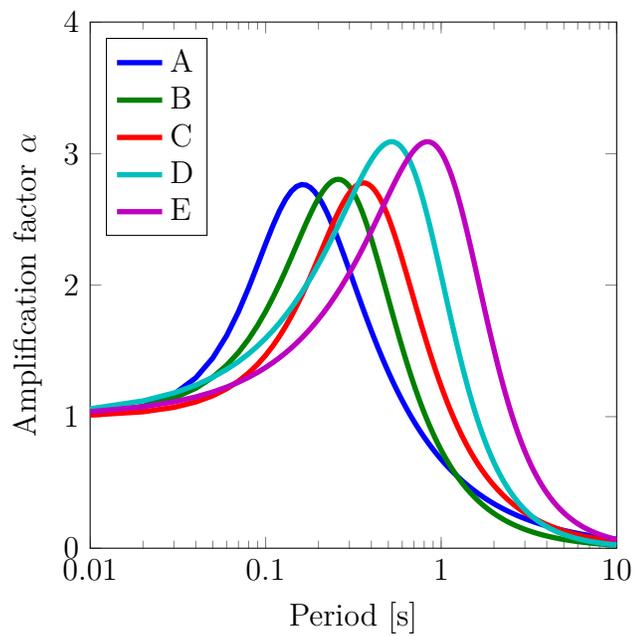


Figura 2.4: Factor de forma espectral de la clasificación de suelos de la norma chilena oficial [Ins].

Capítulo 3

Base de datos

La ingeniería sísmica es una disciplina científica cuyo objeto de estudio son los fenómenos sísmicos y sus efectos sobre todo tipo de estructuras. Su inicio fue motivado por la necesidad de diseñar políticas y técnicas de mitigación de pérdidas materiales y vidas humanas. Si bien existe evidencia de la ocurrencia de eventos sísmicos desde la existencia misma de la vida humana, sólo desde el siglo pasado los avances tecnológicos han permitido lograr medir sus efectos en superficie de forma detallada a través de instrumentos especializados de registro de movimiento. Esto hace que a pesar que su marco teórico avanza a un ritmo de desarrollo permanente, cada nuevo gran evento sísmico significa un gran salto que trae múltiples lecciones y nuevos conocimientos aún en nuestros días. A pesar que es probable que no podamos anticipar todos los efectos y características del próximo mega terremoto en Chile, si sabemos que el estudio estadístico de los efectos de eventos anteriores nos puede dar luz acerca de patrones de comportamiento y efectos en superficie para los que se puede proyectar una estimación.

En este Capítulo se compilan los registros de aceleraciones disponibles para los principales terremotos chilenos desde 1985, con el objetivo de poder utilizarlos en el estudio de sus diversos efectos. Si bien la motivación original corresponde al desarrollo de curvas de atenuación, la información contenida también puede ser útil para distintos tipos de estudios.

Compilaciones anteriores de datos de terremotos chilenos han sido desarrolladas por *Contreras* [Con09], quién utiliza registros obtenidos tanto por la Red Nacional de Acelerógrafos del Departamento de Ingeniería Civil (RENADIC) como por el Servicio Sismológico (SSUCH) entre 1981-2008, ambas unidades de la Universidad de Chile. Posteriormente dicha base de datos es actualizada en *Contreras y Boroschek* [CB12] con los datos del terremoto de Maule 2010, pero eliminando eventos de magnitudes intermedias y bajas. A su vez *Ruiz y Saragoni* [RS05] trabajaron con datos similares obtenidos hasta 2005, pero considerando además eventos intraplaca de profundidad intermedia.

3.1. Acceso a registros de aceleraciones y catálogos

Se recogen los registros de aceleraciones completos de bases de datos de estudios previos [CB12, RS05] y se completan con los datos faltantes hasta el 23-08-2014 para la red RENADIC y hasta 23-07-2014 para la red administrada por el Centro Sismológico Nacional (CSN), que incluyen el terremoto de Iquique 2014 y su réplica del 3 de abril. Cada uno utiliza su propio formato de almacenamiento¹, por lo que se sigue un procedimiento semi-automatizado para compilar cada caso en una estructura de organización de información única que permita su proceso, que cuenta con los siguientes pasos generales:

1. Se escribe un programa de extracción automática de información para el tipo de archivo específico del registro. De él se obtienen referencias mínimas como la fecha y hora del evento, la estación de donde se ha obtenido el registro y las series de tipo del movimiento registrado en cada componente.
2. Se construye una lista de los eventos asociados a cada registro, identificando su fecha y hora, más toda información adicional disponible del terremoto². La información faltante respecto a parámetros descriptivos del terremoto, se obtiene de una lista de catálogos desarrollados por distintas agencias internacionales y nacionales, que se consultan en orden de prioridad. En los casos donde no existe ninguna información del evento en el archivo que contiene la información (*sac*, *v1* de manera parcial, *txt*), la lista de eventos se obtiene de la organización de directorios que poseen los registros dentro de carpetas de año, mes y día o de archivos específicos que contienen esta información dentro del directorio respectivo, si se da la situación.

La información referente a las estaciones se obtiene para la red RENADIC del catálogo publicado en su sitio web³, mientras que para el CSN y SSUCH de información proporcionada a través de comunicaciones personales.

3. La información se organiza en estructuras asociadas a una identificación única a través de un objeto tipo contenedor de MATLAB que es guardado con el nombre *CatalogoEventos.mat*. La etiqueta de identificación de cada terremoto es un objeto *string*, con el formato AAMMDDhhmm⁴. De manera análoga se construye un contenedor de nombre *CatalogoEstaciones.mat* para la información de las estaciones, donde el *string* identificador es su código según la Tabla (A.2).
4. Las series de tiempo se guardan en un objeto aparte explicado más adelante y programado especialmente para contener toda la información requerida y al mismo tiempo realizar los cálculos de parámetros que se utilizan en estudios de curvas de atenuación y amplificación dinámica.

¹En el caso del CSN se utilizan los formatos *sac* y *miniseed* predominantemente, además de un grupo en *txt*. En el caso de RENADIC, el formato único de registros no procesados es *v1*.

²En el caso del formato *miniseed*, es posible obtener la localización del hipocentro (latitud, longitud y profundidad) y de la estación

³Disponible en el sitio: <http://terremotos.ing.uchile.cl/bajar/reporte/66> [Consultado 11-03-2015]

⁴AA: últimos dos dígitos del año. MM: mes correspondiente en el rango 01-12. DD: día correspondiente en el rango 01-31. hh: hora correspondiente en el rango 00-23. mm: minutos correspondientes en el rango 00-59.

Las localizaciones de los hipocentros de la lista de eventos construida se obtienen de la siguiente lista de catálogos, respetando el orden de prioridad indicado:

1. *Cennential Earthquake Catalog*. [EV]
2. Boletín On-Line del *International Seismological Centre*. [Int12]
3. Catálogo On-Line del Centro Sismológico Nacional. [Cen14].
4. Catálogo On-Line del *U.S. Geological Survey* [Nat15]

Las magnitudes M_w , así como otros resultados del cálculo del tensor de momento, tales como rumbo, manteo y mecanismo del terremoto, se obtienen a partir de la siguiente lista de catálogos, respetando el orden de prioridad indicado:

1. *Cennential Earthquake Catalog*. [EV]
2. *Global CMT Catalog Search*. [DCW81, END12]
3. Catálogo On-Line del *U.S. Geological Survey* [Nat15]

3.2. Organización de la información

A medida que se adquiere información, ésta se almacena en arreglos que luego se convierten en objetos contenedores a modo de facilitar un acceso rápido a la información mediante un identificador. Sin embargo, mientras más objetos forman parte del contenedor, más tiempo tarda la base de datos en compilarse desde cero o realizar un cálculo de un parámetro específico, que luego guarda. Toda modificación de información, por muy básica que sea (como eliminar/agregar un nuevo registro o modificar los valores de un filtro), se convierte inevitablemente en una larga espera mientras se calculan nuevamente todos los resultados.

La incorporación de programación orientada en base a objetos permite sectorizar el procesamiento de la base de datos. Mediante la definición de objetos que representan las diferentes partes de los datos, se pueden automatizar procedimientos complejos de manera ordenada. Tareas grandes se terminan por compartimentar en otras más pequeñas. De esta forma, si bien la información proveniente de catálogos tanto para estaciones como para eventos, sigue siendo estática⁵, toda parte referida a la realización de un cálculo hasta el almacenamiento de un resultado se construye en base a objetos.

En la Tabla (3.1) se muestran las definiciones de objetos programados para trabajar la parte estática de la base de datos. El conjunto de operaciones que realiza cada uno de ellos, especificadas en la descripción, obedecen a un sistema de clasificación general de 4 niveles a partir de su funcionalidad (Figura (3.1)). En el nivel 1 se agrupan todos los procedimientos necesarios para compilar la información descrita en la sección (3.1), cuyas funciones son

⁵Son catálogos representados por objetos contenedores. La lentitud de su construcción es contrarrestada por la rapidez de acceso y carga desde un archivo *.mat*

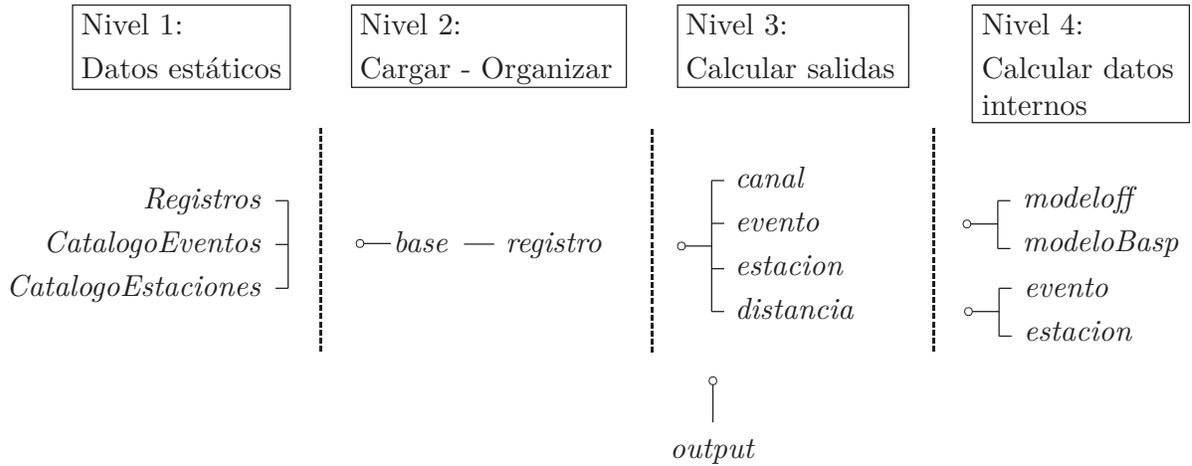


Figura 3.1: Diagrama de funcionalidades de los objetos que representan la base de datos.

de almacenamiento de información básica no procesada. En el nivel 2 operan dos clases con funciones similares. El objeto *base* se encarga de cargar los datos del nivel anterior, entregando el punto inicial para comenzar a operar. A su vez el objeto *registro* vincula los objetos del nivel 3, construyendo cada uno con la información obtenida de *base*. En el nivel 3 están todos aquellos objetos que portan operaciones y propiedades cuya funcionalidad es producir la información necesaria para la construcción de las curvas de atenuación (ver Tablas (3.2), (3.3) y (3.4)). Por último, en el nivel 4 se encuentran aquellos objetos que realizan cálculos intermedios previos al resultado del nivel 3.

La salida de resultados desde el nivel 3 está organizada en *output*. Sus propiedades se definen en la Tabla (3.5), donde la mayoría corresponden a valores y rangos de su funcionalidad de filtro. Esto permite sectorizar el procesamiento de la información, disminuyendo los tiempos de cálculo. Gracias a sus funcionalidades de producir gráficos de diverso tipo, además de la posibilidad de imprimir listas de datos en pantalla, permite "navegar" por la información, visualizando la sectorización realizada. Adicionalmente a las funciones de filtrar y graficar, tiene la capacidad de exportar la sectorización en forma de Tablas de datos en *txt* y archivos de datos de extensión *mat*.

3.3. Criterios de selección

La información histórica disponible de registros de aceleraciones es variada tanto por las características de los eventos a los cuales pertenece, como por la calidad misma de los datos. Si bien es deseable en estudios estadísticos de parámetros, contar siempre con la máxima cantidad de datos, partes importantes de información sesgada o incorrecta pueden alterar los resultados.

Con el objetivo de reducir al mínimo la información ambigua e incorrecta en un conjunto

Tabla 3.1: Definiciones de los objetos utilizados para el cálculo y almacenamiento de parámetros.

Clase	Descripción
<i>base</i>	Carga, almacena y pone a disposición de otros objetos que operen con ella la información de catálogos de eventos y estaciones, más el arreglo de series de tiempo.
<i>registro</i>	Organiza la serie de objetos que describe la información entorno a un registro. Construye y almacena objetos de canal para cada componente, evento, estación y distancia. Además calcula parámetros asociados a todo el registro, como la razón de espectros de respuesta H/V.
<i>canal</i>	Realiza cálculos referentes a las series de tiempo de aceleraciones almacenando sus resultados. Ver Tabla (3.2).
<i>estacion</i>	Carga y ordena los parámetros asociados a la estación del registro. Ver Tabla (3.3)
<i>evento</i>	Carga y ordena los parámetros asociados a la estación del registro. Además realiza diferentes cálculos de propiedades de la fuente sísmica. Ver Tabla (3.4)
<i>distancia</i>	Almacena resultados y realiza cálculos de distancia entre la estación y diferentes modelos de fuente sísmica para un evento específico. Ver Tabla (4.7)
<i>modeloff</i>	Carga parámetros necesarios y calcula modelos de falla finita para definiciones de áreas de ruptura. Ver Tabla (4.6)
<i>modeloBasp</i>	Carga parámetros necesarios y calcula modelos de falla finita para definiciones de zonas de asperezas de primer tipo. Funciona como una extensión de <i>modeloff</i> para áreas definidas por más de un elemento cerrado.
<i>output</i>	Grafica, exporta y filtra según rangos de parámetros especificados los resultados obtenidos. Ver Tabla (3.5)

Tabla 3.2: Definición y descripción de propiedades del objeto *canal*.

Propiedad	Descripción
<i>Serie</i>	Los valores procesados del registro completo.
<i>PGA</i>	El valor máximo del registro.
<i>Espectro</i>	Valores del espectro de respuesta de aceleración a un 5% de amortiguamiento, donde la primera columna posee los valores del vector de periodos y la segunda las amplitudes del espectro.
<i>Fourier</i>	Transformada de Fourier de la señal, donde la primera columna posee los valores del vector frecuencia y la segunda las amplitudes de la transformada.
<i>Proceso</i>	Indicación práctica de si la señal ha sido o no procesada.
<i>Componente</i>	Orientación del canal en el cuál se realiza el registro.
<i>Muestreo</i>	La tasa de muestreo en [Hz] de digitalización del registro.

Tabla 3.3: Definición y descripción de propiedades del objeto *estacion*.

Propiedad	Descripción
<i>Nombre</i>	Nombre o código de 3-5 letras como abreviatura al nombre original.
<i>Latitud</i>	Valor en [deg] de latitud extraído directamente del catalogo-contenedor de estaciones.
<i>Longitud</i>	Valor en [deg] de longitud extraído directamente del catalogo-contenedor de estaciones.

Tabla 3.4: Definición y descripción de propiedades del objeto *evento*.

Propiedad	Descripción
<i>ID</i>	Código de identificación del evento en formato AAMMDDhhmm.
<i>Fecha</i>	Valor de fecha en formato AAAA-MM-DD extraído directamente del catalogo-contenedor de eventos.
<i>Magnitud</i>	Valor de magnitud M_w extraído directamente del catalogo-contenedor de eventos.
<i>Latitud</i>	Valor en [deg] de latitud del hipocentro extraído directamente del catalogo-contenedor de eventos.
<i>Longitud</i>	Valor en [deg] de longitud del hipocentro extraído directamente del catalogo-contenedor de eventos.
<i>Profundidad</i>	Valor en [km] de la profundidad focal del hipocentro extraído directamente del catalogo-contenedor de eventos.
<i>ReferenciaHip</i>	Referencia al catálogo de donde se obtienen las coordenadas del hipocentro.
<i>ReferenciaMag</i>	Referencia al catálogo de donde se obtienen los parámetros del tensor de momento (M_w , rumbo, manteo y mecanismo).
<i>Mecanismo</i>	Identificación del mecanismo del terremoto. Eventos intraplaca de profundidad intermedia se indican con una letra I, mientras que los interplaca de tipo thrust con una T.
<i>ModeloRuptura</i>	Almacena y crea un objeto independiente que representa un modelo de ruptura de falla finita general, en caso de existir.
<i>ModeloAspI</i>	Almacena y crea un objeto independiente que representa zonas indicadas como asperezas de primer tipo, en caso de existir.
<i>ModeloAspII</i>	Almacena y crea un objeto independiente que representa zonas indicadas como asperezas de segundo tipo, en caso de existir.

Tabla 3.5: Definición y descripción de propiedades del objeto *output*.

Propiedad	Descripción
<i>minPGA, maxPGA</i>	Valores en [g] del rango de PGA de las componentes horizontales en media geométrica para el filtro.
<i>minM, maxM</i>	Valores del rango de magnitud M_w para el filtro.
<i>minD, maxD</i>	Valores en [km] del rango de distancias a la fuente sísmica para el filtro.
<i>Mecanismo</i>	Indicador del tipo de terremoto para el filtro.
<i>ClaseSuelo</i>	Indicador del tipo de clase del suelo para el filtro.
<i>Estacion</i>	Nombre o código de la estación para el filtro.
<i>Evento</i>	Código identificador del terremoto para el filtro.
<i>Resultados</i>	Arreglo de objetos <i>registro</i> que representa el total de datos organizados según la Figura (3.1).
<i>PosSeleccion</i>	Matriz que guarda los indicadores a los datos filtrados.

considerable de datos con múltiples fuentes de información, se implementan dos tipos de criterios de selección. Los criterios de primer tipo se aplican respecto a las características que es posible conocer antes de realizar cualquier cálculo, es decir, con la información disponible en el nivel 1 de la base de datos (Figura (3.1)). Los segundos se aplican luego que ha sido procesada toda la información, en el momento antes de comenzar a trabajar con los resultados en la deducción de los modelos respectivos.

Los criterios de primer tipo son:

1. *Magnitudes M_w* : Se utilizan únicamente registros de aceleraciones con eventos que posean su tensor de momento calculado, es decir, una magnitud M_w calculada. Se permiten dos excepciones a este criterio para dos réplicas del terremoto de Chile Central 1985 de magnitud M_s 6.4 y 7.4 respectivamente, donde se consideran estos valores como si fueran magnitud M_w . Si bien es conocido que existen relaciones de conversión en escalas de magnitudes, en el rango de magnitud donde se encuentran estos eventos casi no existe saturación de M_s .
2. *Registros con tres componentes*: Se utilizan sólo registros que poseen ambas componentes horizontales ortogonales además de la vertical. Esto independiente de si en algunos casos las componentes horizontales se consideran por separado o como sólo una a través del cálculo de algún tipo de media.
3. *Cantidad mínima de datos*: Se ha reducido el estudio únicamente a eventos con mecanismos intraplaca e interplaca *thrust*. En primera instancia porque son los más frecuentes y en consecuencia sobre los cuales existe un mayor interés por conocer sus efectos. Por otro lado y como consecuencia de lo primero, eventos con otros mecanismos como superficiales o *outer – rise* no cuentan con datos suficientes para estudiar sus aceleraciones de suelo promedio de manera seria, al poseer una frecuencia mucho menor.
4. *Interés en eventos significativos*: A modo de seleccionar un rango de eventos cuyos efectos sean significativos para el área de la ingeniería sísmica y la ingeniería estructural, pero conservando el interés de mantener amplitud, se seleccionan inicialmente eventos de magnitud $M_w \geq 5.5$.

Los criterios de segundo tipo se especifican más adelante en el Capítulo 6, donde se abordan en detalle todos los elementos de la derivación de modelos de atenuación para terremotos chilenos interplaca e intraplaca. La Tabla (A.1), incluida en el anexo A, muestra las características de la selección final de eventos utilizada en este estudio.

La Tabla (A.2), incluida en el anexo A, muestra las características de las estaciones sísmicas asociadas a los registros de aceleraciones utilizados. Las Figuras (3.2), (3.3), (3.4) y (3.5) muestran su distribución en todo el territorio chileno. La Figura (3.2) muestra una de las zonas con mayor distribución, que va desde la ciudad de Arica hasta la península de Mejillones, entre las latitudes -18° y -24° aproximadamente. La zona centro es otra de las zonas con mayor densidad de instrumentos, que se muestra en la Figura (3.4), incluyendo a la Región Metropolitana y parte de la Región de Valparaíso, entre las latitudes -32° y -35° aproximadamente.

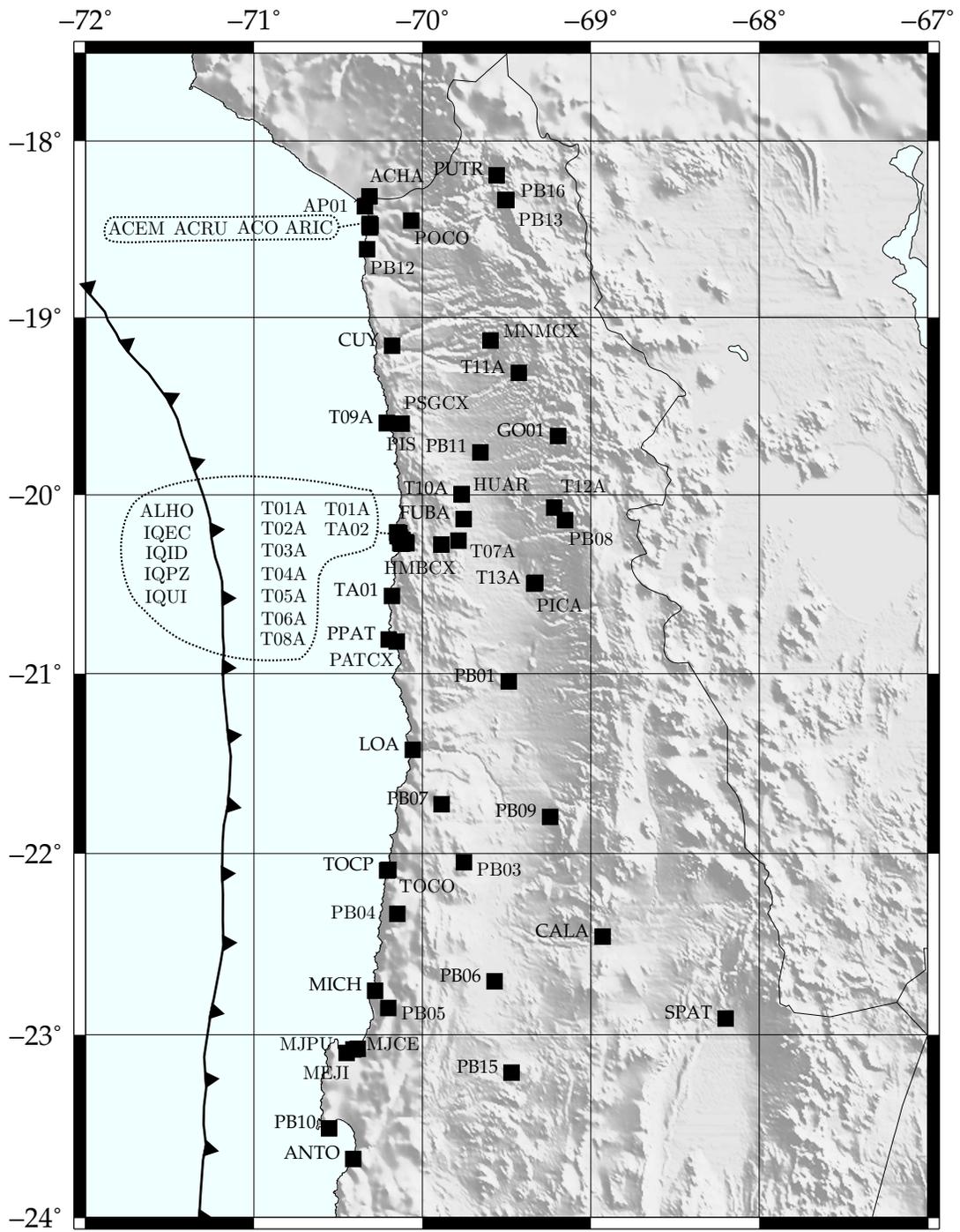


Figura 3.2: Zona norte I: ubicación de estaciones sísmicas pertenecientes a la base de datos.

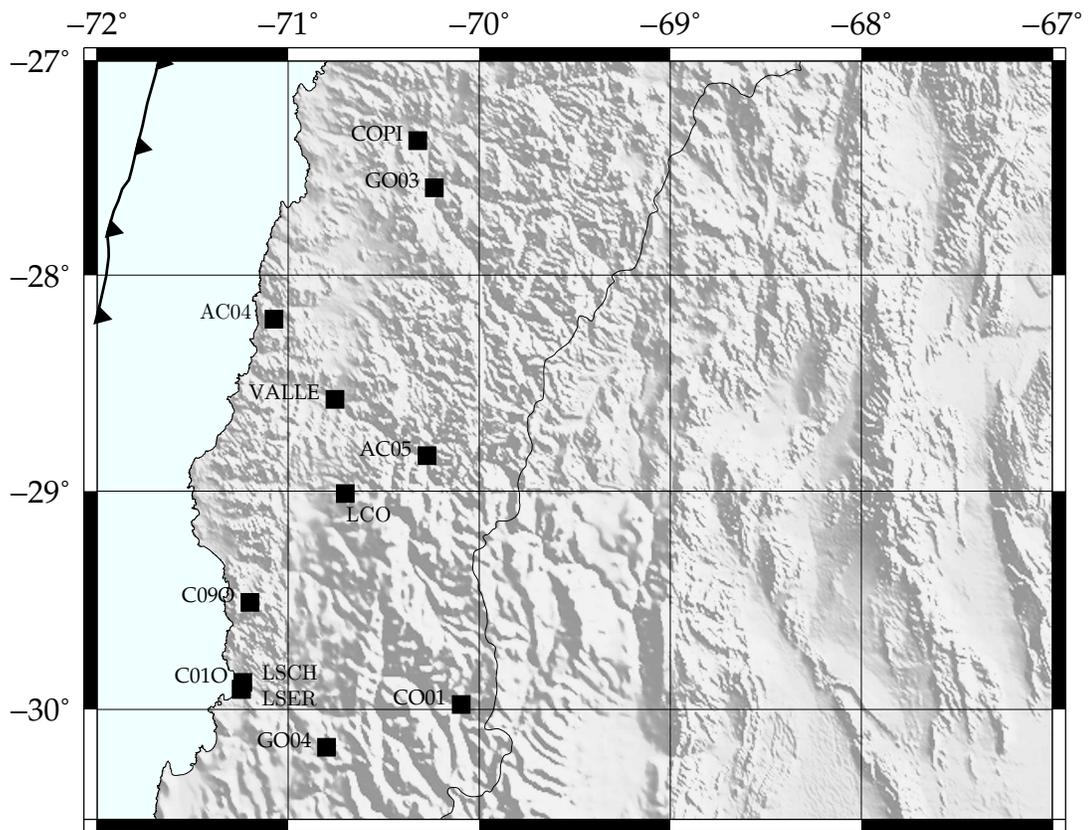


Figura 3.3: Zona norte II: ubicación de estaciones sísmicas pertenecientes a la base de datos.

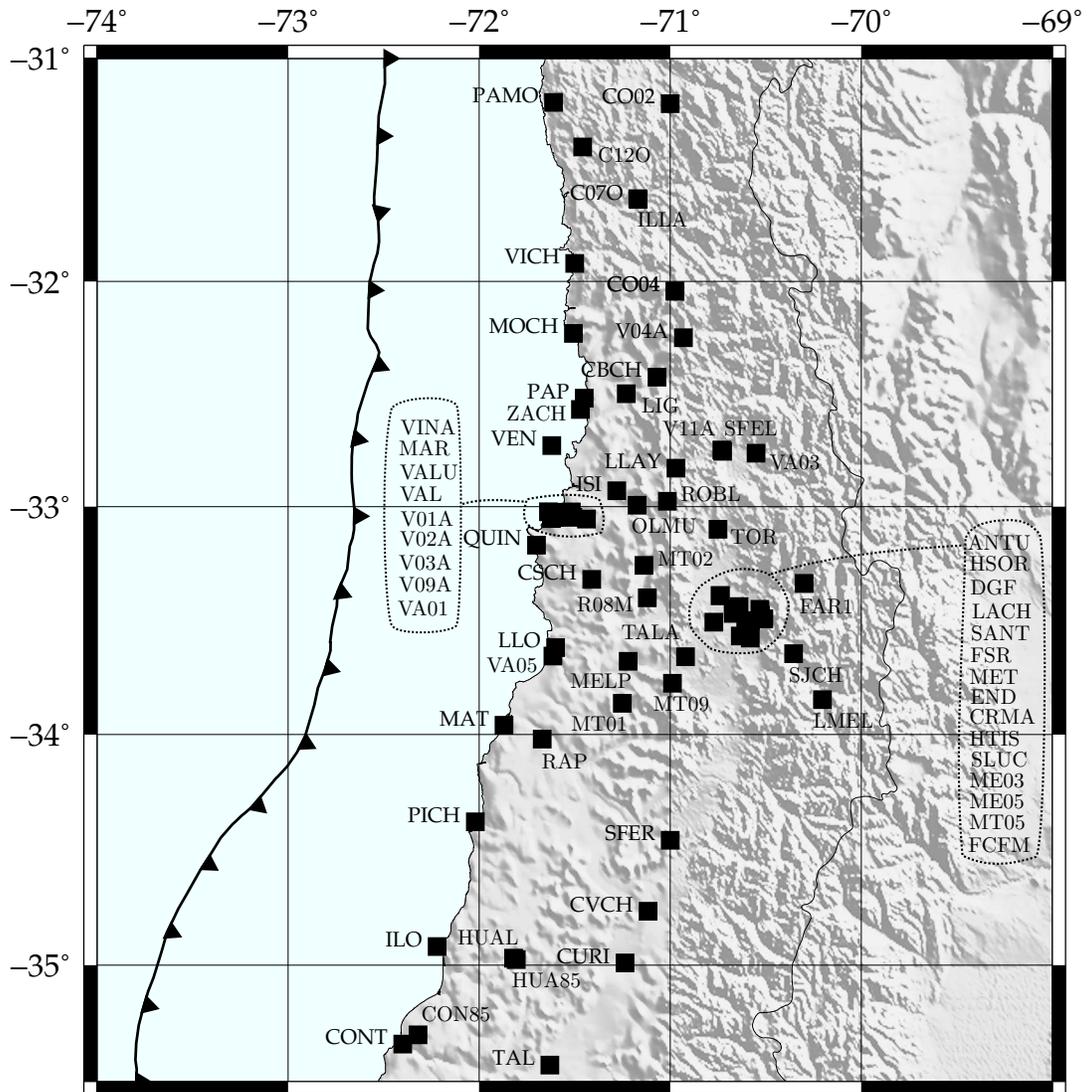


Figura 3.4: Zona centro: ubicación de estaciones sísmicas pertenecientes a la base de datos.

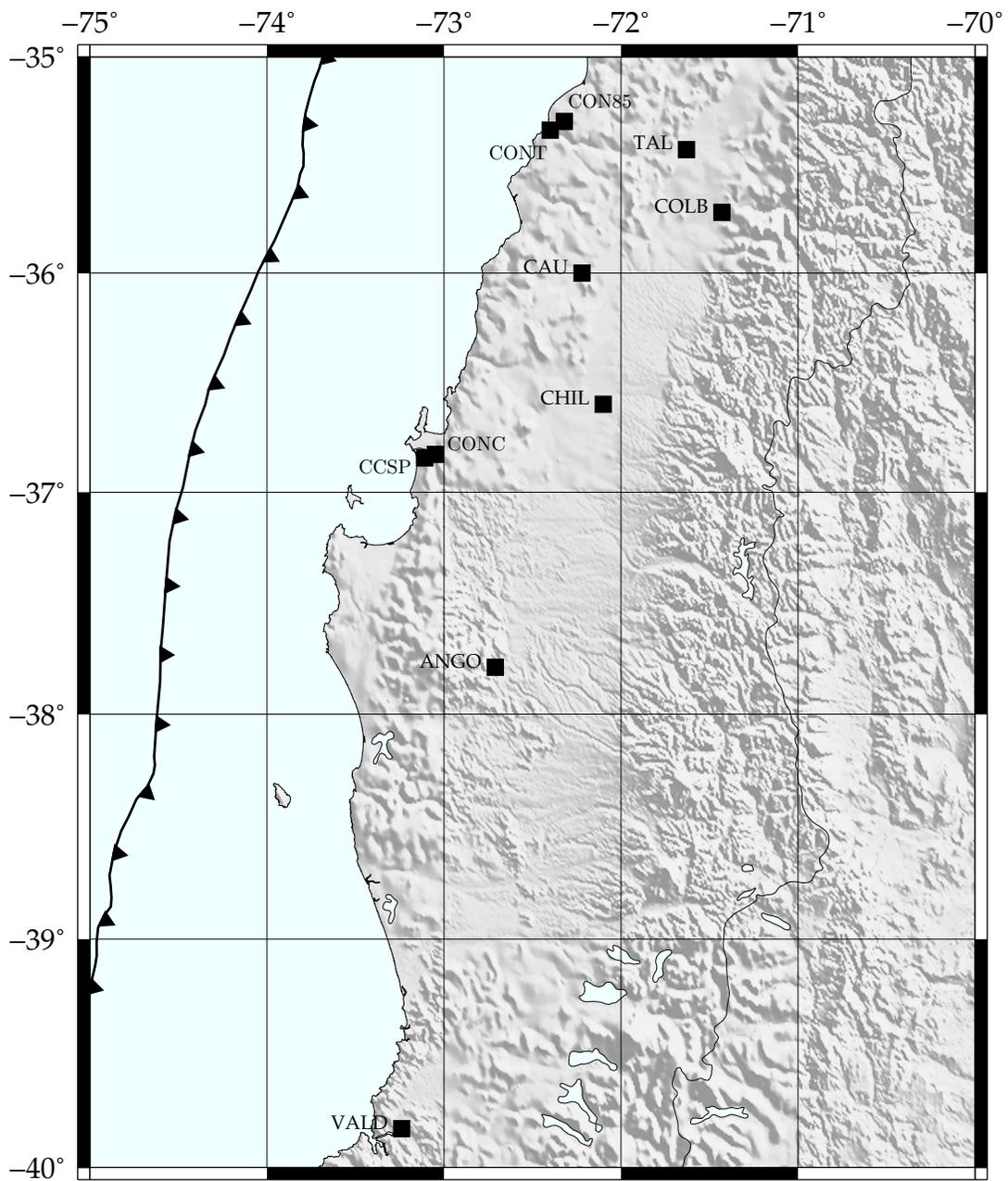


Figura 3.5: Zona sur: ubicación de estaciones sísmicas pertenecientes a la base de datos.

3.4. Procesamiento de señales

Al momento de iniciar un estudio que involucre la utilización de señales de movimiento superficial obtenidas por instrumentos durante un terremoto, se deben considerar las limitaciones que poseen sus formas originales al intentar representar el movimiento real ocurrido. Dadas las características específicas de los instrumentos utilizados y ciertas condiciones ambientales, las señales registradas poseen validez dentro de un rango de frecuencias acotado superior e inferiormente, donde adicionalmente se pueden obtener lecturas asociadas a movimientos o perturbaciones ambientales no relacionadas con el evento sísmico en cuestión. En general resulta imposible procesar señales de forma tal que ésta logre ser igual al movimiento ocurrido. Por lo tanto, el objetivo es disminuir al mínimo posible la relación ruido/señal dentro del rango de frecuencias de interés del estudio específico [BB05] a través de alteraciones realizadas a la lectura original.

Si bien los eventos sísmicos generan ondas sísmicas en todo el espectro de frecuencias, existe un rango específico donde las ondas de la mayoría de eventos alcanzan su máxima amplitud. A partir de él las amplitudes disminuyen tanto hacia frecuencias altas como bajas, aumentando la relación ruido/señal si se considera como mínimo la existencia de un ruido ambiental de amplitud constante para todo el rango de frecuencias. Considerando que salvo contadas excepciones, valores bajos de ruido/señal están asegurados en las frecuencias donde la energía del terremoto es mayor, el procesamiento de señales se concentra en los fenómenos de ruido que afectan los extremos y se suman a un nivel base o ruido de fondo. La existencia de ruido en el extremo de frecuencias bajas, como modificaciones de la línea base de la señal, introduce niveles de error significativos en las aceleraciones de periodos largos para espectros de respuesta de desplazamiento y aceleración. Por otro lado, el ruido de alta frecuencia, producto del funcionamiento de equipos o contaminación de la alimentación eléctrica por nombrar algunos, pueden llegar a introducir errores importantes en función de su nivel de amplitud relativa al nivel de amplitud del contenido de baja frecuencia.

Además del ruido y sus diferentes formas, las características dinámicas del sensor también pueden alterar la lectura del movimiento superficial. La Figura (3.6a) muestra la respuesta teórica [PKHR12] de un oscilador de un grado de libertad de frecuencia natural $f_n = 1$ [Hz] y de amortiguamiento $\beta = 5\%$. Cuando este sistema es excitado ante una señal de amplio y variable contenido de frecuencias, como puede ser un terremoto, reproduce con igual amplitud en su propio movimiento las ondas de frecuencias menores a f_n , aumenta aquellas de frecuencias cercanas a la vecindad de f_n y disminuye progresivamente las de frecuencias mayores a f_n . En general este es el mismo comportamiento de los sensores instalados en los acelerómetros utilizados para registrar señales de aceleración superficial durante eventos sísmicos. Por lo tanto, sensores con valores altos de β son deseables, pues reducen la vecindad donde se amplifican las amplitudes del movimiento registrado respecto al ocurrido. De forma similar, frecuencias naturales amplias permiten mayores rangos de *respuesta plana*, donde no se hace necesaria una corrección instrumental. Si bien la mayoría de los acelerómetros digitales modernos poseen en cantidad suficiente ambas cualidades, existen registros de terremotos importantes, como el de la zona central $M_w = 8.0$ de 1985, que fueron registrados con instrumentos análogos de $f_n = 25$ [Hz] aproximadamente.

Respecto a los instrumentos digitales, los instrumentos análogos poseen una serie de des-

ventajas [BB05]. No realizan un registro continuo, sino que se activan cuando la aceleración alcanza un nivel umbral que dispara la grabación, por lo que se pierden los primeros arribos de ondas. Debido a las necesidades de su proceso dinámico de oscilación, poseen frecuencias naturales cercanas a 25 [Hz], que limitan el rango efectivo de validez de las señales de movimiento por el motivo antes descrito. Además, ya que el registro se realiza sobre una lámina física de papel u otro material, las señales deben ser digitalizadas, lo que implica un mayor costo de recursos en su producción y una mayor fuente de introducción de ruido. Respecto a los anteriores, los sensores digitales graban en continuo, poseen frecuencias naturales mayores a 50 [Hz], estando en algunos casos por sobre los 200 [Hz], y además no requieren de digitalización, pues la conversión análoga digital se da dentro del mismo instrumento [BB05].

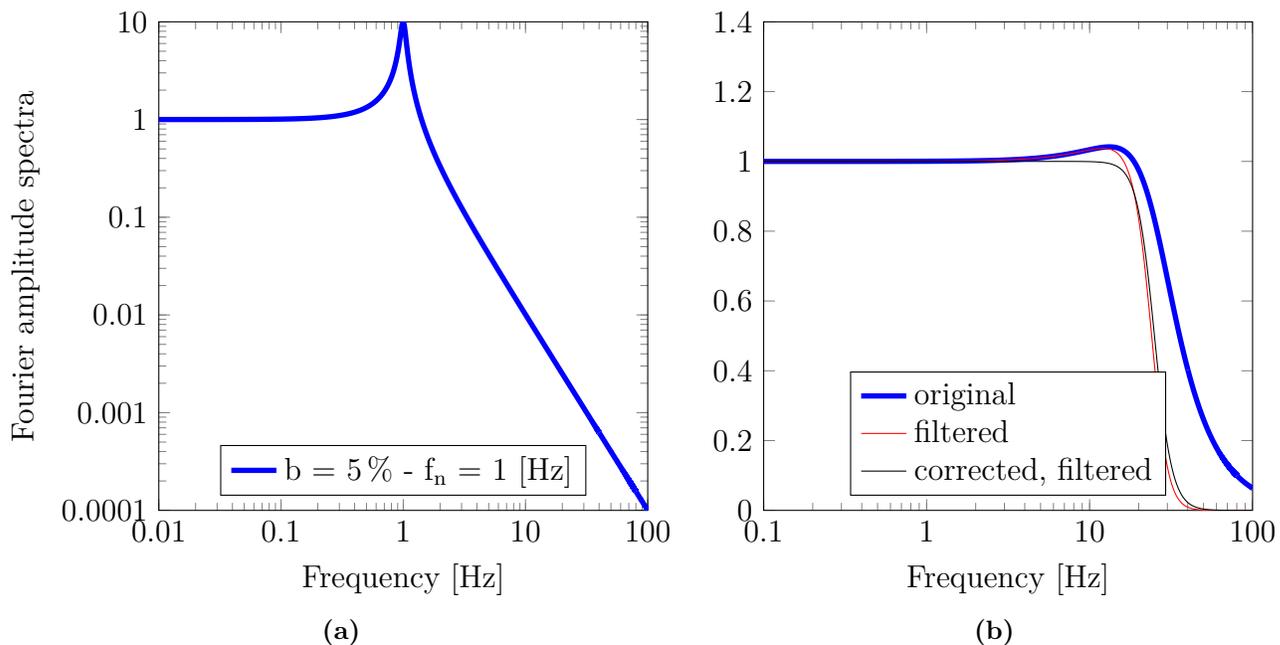


Figura 3.6: (a) Función de transferencia teórica de un oscilador de 1 grado de libertad amortiguado con frecuencia natural de 1 [Hz] y 5% de amortiguamiento crítico. (b) Variaciones de la respuesta dinámica teórica de un instrumento análogo con frecuencia natural de 25 [Hz] y 60% de amortiguamiento crítico respecto a diferentes procesamientos.

Para resolver los problemas de ruido, se utilizan filtros que recortan la amplitud de la señal a partir de cierta frecuencia de esquina f_c . En el caso que además la frecuencia natural del sensor sea baja, como ocurre para los sensores análogos, existen métodos de corrección que permiten restituir la pérdida de amplitud en alta frecuencia [Tri72]. Sin embargo, esta operación en la práctica significa amplificar tanto la señal original como su parte de ruido, para más tarde volver a aplicar un filtro pasa bajo en los 25 [Hz] producto de las limitaciones propias de la digitalización de registros análogos generados por acelerómetros SMA-1 [AKYB11]. Considerando las recomendaciones de diferentes autores respecto a no corregir instrumentalmente registros de sensores análogos, salvo contadas excepciones identificadas por una inspección de cada registro de aceleraciones por separado [BB05, AKYB11, DB11], en este estudio se decide no corregir la respuesta instrumental de acelerómetros SMA-1 y QDR, filtrando todos sus registros con un filtro *butterworth* pasa bajo de cuarto orden. La Figura (3.6b) muestra las variaciones de la respuesta teórica de un oscilador de un grado de

libertad con $\beta = 60\%$ y $f_n = 25$ [Hz], características dinámicas aproximadas de los SMA-1. Tanto la respuesta filtrada como la corregida y luego filtrada poseen formas muy similares, justificando la decisión respecto al procesamiento de los registros de este tipo de instrumentos. La variación visible entre ambas sobre 25 [Hz] es menor a un 5% y el filtro genera una pérdida de la amplitud del movimiento original de 10% a los 19 [Hz]. Se obtienen similares resultados para $\beta = 70\%$, amortiguamiento aproximado de los instrumentos QDR, versiones modificadas del SMA-1 que incorporan un convertidor análogo-digital en el instrumento.

Existen diversos tipos de filtros según el tipo de decaimiento que posean, donde uno de los más comunes en la ingeniería sísmica es el *Butterworth*⁶, el que se puede aplicar de manera causal o acausal. Debido al interés por no generar fases en la señal, *Boore* [Boo04] recomienda el último. La forma del decaimiento para la versión pasa bajo del filtro butterworth en el espacio de frecuencias, se define como [Boo08]

$$Y = \frac{\left(\frac{f}{f_c}\right)^{2n}}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2n}} \quad (3.1)$$

donde el número $2n$ determina la velocidad del decaimiento y f_c representa la frecuencia esquina. Dentro de las herramientas programadas que posee MATLAB [Mat], la función *butter* permite diseñar un filtro del tipo butterworth, indicando su orden y las frecuencias de esquina relativas a la mitad de la frecuencia de muestreo de la serie de tiempo. La Figura (3.7) muestra filtros diseñados por esta función, considerando un $n = 2$ para pasa banda y un $n = 4$ para pasa bajo y pasa alto. Para la aplicación de cada uno de ellos en el tiempo, se ha utilizado la función llamada *filtfilt*, que convoluciona la señal con los filtro dos veces en direcciones opuestas garantizando una fase nula en el resultado final. Es posible identificar que la función ha duplicado el orden del filtro pasa banda, hasta lograr un decaimiento muy similar al de los pasa bajo y pasa alto. Adicionalmente la esquina superior se ha construido de manera simétrica a la inferior, mientras que para las definiciones de filtros pasa bajo y pasa alto, la esquina superior muestra una curvatura menos acentuada que la inferior. Para la Figura (3.7b) se han agregado las formas teóricas de los filtros pasa alto y pasa bajo de orden 4 y 8, donde el pasa alto se puede escribir de la forma

$$Y = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2n}} \quad (3.2)$$

La Figura (3.7b) muestra un efecto inverso respecto a la forma del filtro pasa bajo, moviendo la curvatura menor a la parte inferior y quedando la mayor en la parte superior, lo que define una relación antimétrica entre ambos filtros. Sin embargo, la función *butter* pasa banda modifica dicho comportamiento y muestra simetría ya no solo entre curvaturas de esquinas superiores e inferiores, sino que en su parte pasa alto y pasa bajo.

En este estudio se utilizan las funciones *butter* en sus versiones pasa alto y pasa bajo de cuarto orden o decaimiento $2p = 8$, aplicándose por separado y en serie según sea necesario. Si por ejemplo, si se hubiese querido diseñar el mismo filtro con igual decaimiento a partir de la versión pasa banda de *butter*, se debería indicar un $n = 2$. Se opta por la primera opción pues no siempre será necesario aplicar filtros pasa bajo.

⁶Otras formas de filtros son el *Chebyshev* de diferente tipo, *Elíptico*, *Bessel*, etc.

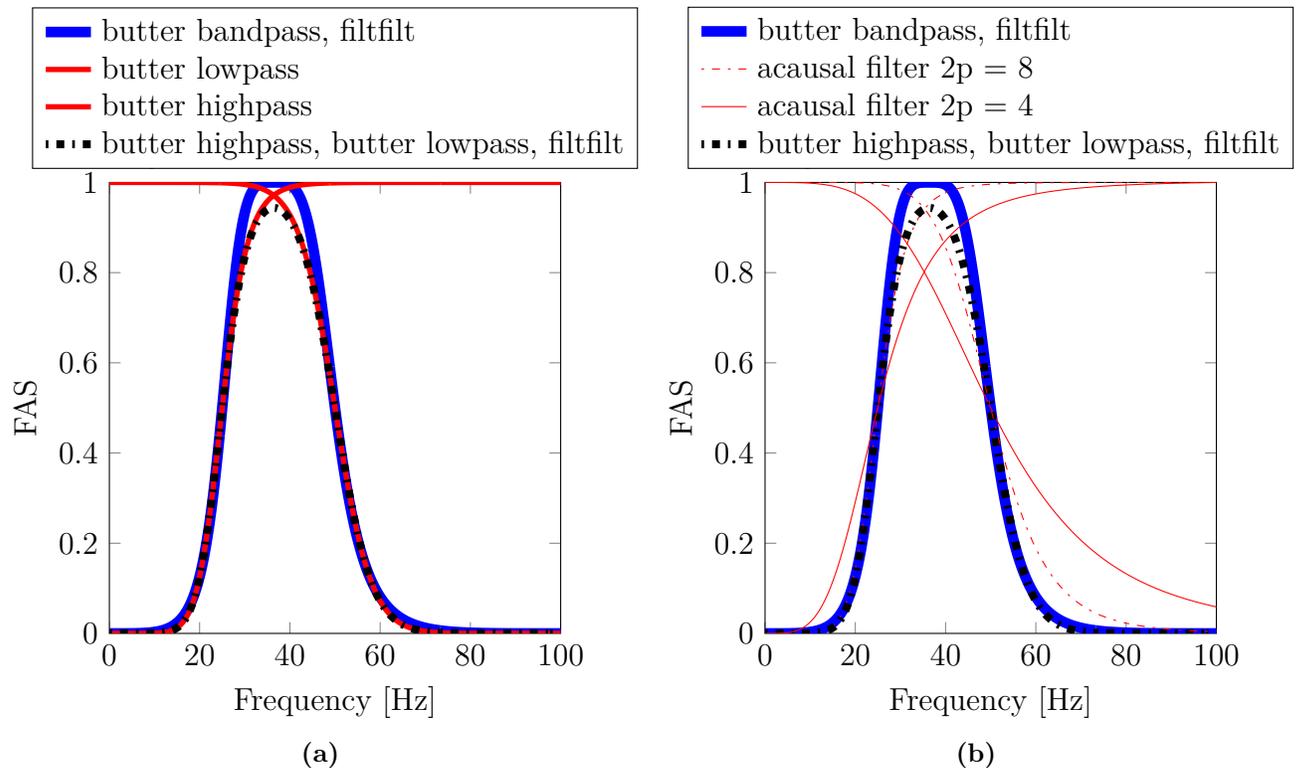


Figura 3.7: Comparación de los filtros diseñados por la función *butter* y *filtfilt* de MATLAB y la aplicación directa de sus definiciones en el espacio de la frecuencia. (a) La diferencia entre usar el algoritmo interno de *butter* para pasa banda versus la idea de utilizar secuencialmente un filtro highpass y lowpass. (b) La comparación de los decaimientos de lo anterior con los teóricos para filtros acausales.

3.4.1. Selección de límite de periodo largo y frecuencia esquina filtro pasa alto

El desarrollo creciente de la ingeniería civil hacia estructuras de periodos más largos, como edificios de gran altura, estructuras con sistemas de aislamiento sísmica y puentes de vanos largos, plantean la necesidad de ampliar los rangos de periodos para los cuales los modelos de atenuación entregan resultados [AKYB11]. La presencia de pequeñas variaciones en los registros de aceleraciones para el caso de instrumentos digitales [AB09] y errores en la conversión análogo-digital para los análogos, son unas de las principales fuentes de errores para baja frecuencia que limitan la posibilidad de obtener valores del espectro de respuesta de aceleraciones para osciladores de periodos largos. Los efectos de este tipo de ruido son reconocibles al integrar los acelerogramas una y dos veces, obteniendo registros de velocidad y desplazamiento de formas inusuales. Para registros análogos representan movimientos físicamente imposibles, como desplazamientos de 15 [s] de periodo, mientras que en el caso digital es posible identificar desviaciones incrementales de la línea base del registro de aceleraciones que algunas veces terminan en valores diferentes de cero [AB09]. Saltos o pulsos en una lectura del registro de aceleraciones, conocidos como *errores no estandar* en registros análogos digitalizados [BB05], se verán como desplazamientos permanentes de la señal de

velocidad integrada.

A la hora de remover estos efectos, conocidos como desplazamientos de líneas base [BB05, AB09], se debe considerar la posibilidad que existan múltiples desviaciones. En el caso de la identificación de errores no estandar, se puede reemplazar el valor de la lectura de aceleración específica de aquel punto por el promedio entre los valores anterior y siguiente [BB05]. Para eliminar tendencias lineales identificadas en el registro de velocidad, es necesario aplicar técnicas de corrección de tendencias, como la función de MATLAB *detrend*, por tramos. Posteriormente, en el registro de aceleración, se deben introducir desplazamientos totales de la señal de forma que la integración de su señal sea compatible con el registro corregido de velocidad [BB05]. Adicionalmente, en los casos que se cuente con una parte del registro pre-evento, es posible identificar tendencias y saltos sistemáticos propios de comportamientos del instrumento y que se pueden descontar para corregir la señal [BB05].

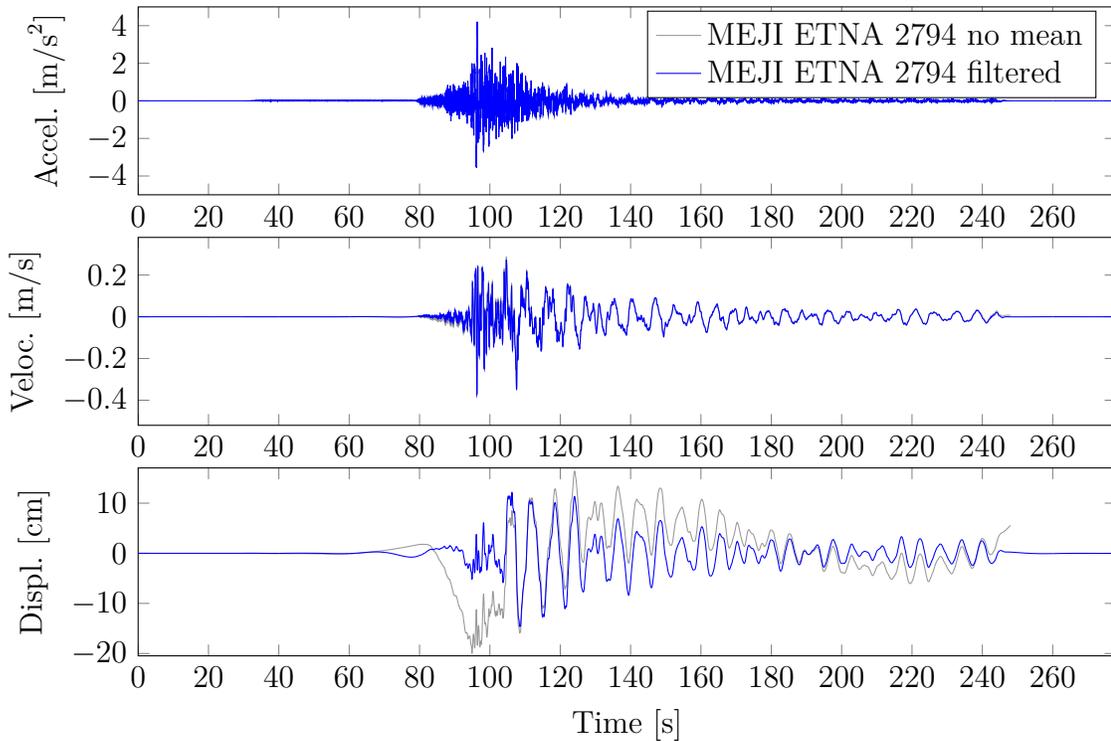


Figura 3.8: Verificación de la remoción de ruido de baja frecuencia considerando la eliminación de líneas base y la aplicación de un filtro pasa alto. El registro de aceleración corresponde al terremoto de Tocopilla 2007 obtenido en la estación MEJI. Las series de tiempo de velocidad y desplazamiento se obtienen integrando la aceleración una y dos veces respectivamente.

En general esta forma de corrección puede llegar a ser bastante efectiva al eliminar gran parte del ruido de baja frecuencia. Sin embargo, cuenta con la desventaja que la elección de los parámetros utilizados en la corrección posee una gran componente subjetiva, variable de operador a operador. Esto puede llegar a generar importantes variaciones en señales corregidas por diferentes operadores. Adicionalmente, su implementación implica revisar una por una las tres componentes de miles de registros de aceleraciones, lo que puede llegar a ser costoso en términos de recursos humanos.

En consecuencia a lo anterior, para este estudio se realiza una versión simplificada de corrección de la línea base. En primera instancia, si el registro cuenta con información pre-evento, se determina su media y se remueve de la señal completa. Luego, a través de la función de MATLAB *detrend*, se remueve una posible tendencia lineal presente en toda la señal de forma general, que se identifica ajustando una línea recta a ella. Para evitar el fenómeno de *Gibbs*, que implica fuertes distorsiones de la señal al utilizar la transformada de Fourier, se aplica un *tapper* coseno o ventana *Tukey* de 5% de longitud de la señal (ver Figura (3.9)), que fuerza valores nulos en los extremos. Finalmente, siguiendo la recomendación de *Boore* [Boo05] para filtros *Butterworth* acausales de cuarto orden, con frecuencias de esquina cercanas a 0.1 [s], se agrega una longitud equivalente a 30 [s] al inicio y al final de la señal.

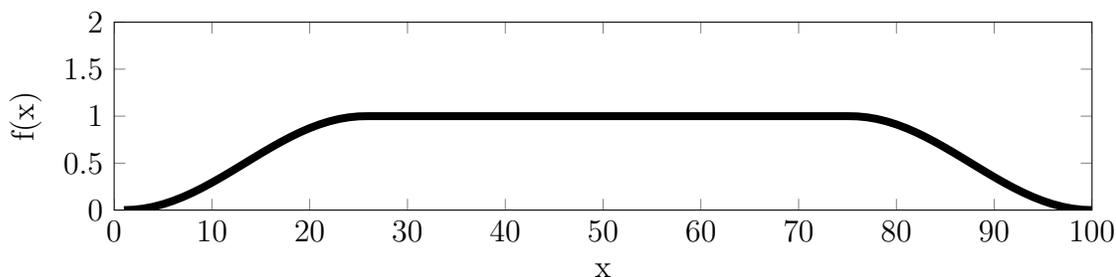


Figura 3.9: Ventana *Tukey* o coseno *tapper* con un 50% de longitud respecto a la duración de la señal.

Por lo general, la corrección básica realizada no permite alcanzar valores del espectro de respuesta de aceleraciones hasta los 10 [s], valor que establecen diferentes proyectos internacionales para la determinación de modelos de atenuación modernos [PCA⁺08, ABA⁺12]. Por lo tanto, adicionalmente se aplica un filtro *butterworth* que elimina tanto el ruido de baja frecuencia restante como la señal de periodos largos que genera los desplazamientos residuales en terremotos importantes. Para simplificar la aplicación de este filtro, se eligen valores constantes para las tres componentes según el tipo de instrumento y los límites arbitrarios definidos en la Tabla (3.6). Estos han sido seleccionados con un criterio conservador, a partir de una muestra de registros de cada tipo y buscando obtener una señal de desplazamiento a partir de la doble integración de la aceleración con oscilaciones de alta frecuencia y que termine en un valor nulo. La Figura (3.8) muestra un ejemplo de las modificaciones en las formas de la señal cuando se aplica el filtro con su valor de frecuencia de esquina correspondiente a un registro obtenido en un instrumento ETNA ubicado en la estación MEJI. Para mejorar los resultados obtenidos, conservando más contenido de señal a través de la aplicación del filtro pasa alto con una frecuencia de esquina superior, se recomienda utilizar un análisis caso a caso de cada componente de cada registro corrigiendo las líneas base según el método más arriba planteado. Posteriormente, según las recomendaciones de *Boore*, si se quiere obtener un periodo más largo, se debe aplicar un filtro pasa alto con una frecuencia de esquina seleccionada para cada componente y para cada registro de manera individual, intentando obtener formas de desplazamientos y velocidades integradas con un sentido físico. Es posible apoyarse también en la forma teórica f^2 que posee el decaimiento del espectro de Fourier en baja frecuencia o comparar las formas de las señales de frecuencia baja de diferentes estaciones cercanas en sus tres componentes para el mismo terremoto [BB05].

Una vez corregida la línea base de forma general y posteriormente aplicado el filtro especí-

Tabla 3.6: Valores de frecuencias de corte para filtros pasa altos indicadas para cada instrumento en función de sus características.

Instrumento	f_{low} [Hz]
QDR	0.10
SMA-1	0.20
ETNA	0.06
CMG	0.06
FBA ES-T	0.06
CMG5	0.06
CSUP 3A	0.06
K2	0.06
SSA-2	0.06
EPISENSOR	0.06

fico según el tipo de instrumento, se determina el valor de periodo T hasta el cual es posible calcular un espectro de respuesta de aceleraciones a 5 % de amortiguamiento representativo del movimiento real. Para esto, se sigue un criterio similar al empleado por *Boore* [BB05]. La Figura (3.10a) muestra el cálculo del espectro de respuesta de desplazamiento, obtenido a partir de la sobre integración de la aceleración, para un 5 % de amortiguamiento de las señales en dos estados de procesamiento: (1) corregida por línea base (*no mean*) y (2) filtrada según el método ya descrito (*filtered*). El valor máximo de T utilizable en este estudio corresponde al punto donde existe una pérdida mayor o igual a un 6 % de la amplitud entre ambos espectros producto de la acción del filtro. Para el caso de la estación MEJI utilizada en el ejemplo de la Figura (3.8), este valor corresponde a 13.5 [s] aproximadamente. La Figura (3.10b) muestra los espectros de Fourier (FAS: *Fourier Amplitude Spectra*) de los estados de procesamiento (1) y (2), donde la línea vertical gris muestra el límite de utilización en frecuencia.

Se repite este mismo procedimiento para todos los registros de la base de datos, aplicando la corrección y recorte de señal descrito, además de seleccionar un valor de periodo largo límite. En función de este límite se definirán posteriormente qué datos se utilizan en las 22 regresiones del modelo de atenuación desde 0.01 [s] hasta 10 [s].

Otros autores [AB06], a partir de un análisis similar del procesamiento de señales de registros de aceleraciones de terremotos europeos, sugieren límites de periodos máximos utilizables que se pueden calcular en función de la frecuencia de corte para diferentes tipos de suelo, instrumentos digitales y análogos, y diferentes valores de magnitud. La certeza de aplicación de estos valores dependen de las características regionales de los eventos sísmicos y sus atenuaciones, por lo tanto se ha preferido utilizar la técnica general que calcula los límites de periodo largo en función a las características específicas de cada registro, atendiendo a las condiciones locales. En algunos casos los límites se encuentran por sobre lo propuesto por *Akkar y Boomer* [AB06] y en otros por debajo.

El procedimiento de procesamiento de señales utilizado asegura el uso de la formulación del pseudo espectro de desplazamientos para obtener valores de desplazamientos máximos para osciladores con 5 % de amortiguamiento a partir de los valores del espectro de respuesta de aceleraciones respectivo. Es decir, conocido el valor de la aceleración, se puede determinar

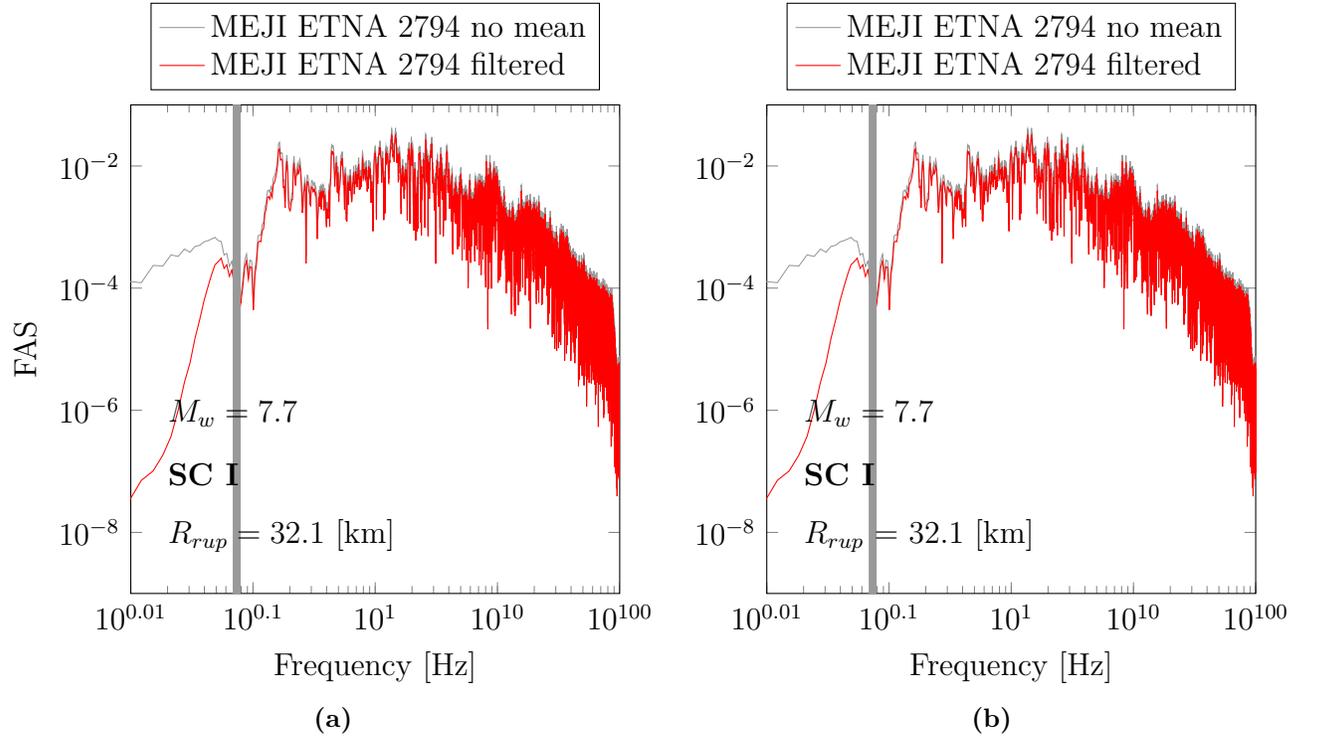


Figura 3.10: (a) Espectros de respuesta de desplazamiento a un 5 % de amortiguamiento obtenidos de un registro de aceleraciones doblemente integrado que ha sido procesado de dos diferentes maneras. La línea vertical representa el límite de periodo largo para el espectro de respuesta de aceleraciones (13.5 [s] en este ejemplo). (b) Espectros de amplitud de Fourier del mismo registro de aceleraciones. Para ambas figuras se utiliza el registro de aceleraciones del terremoto de Tocopilla 2007 obtenido en la estación MEJI.

el desplazamiento a partir de

$$Psd(T) = \frac{T^2}{4\pi^2} Psa \quad (3.3)$$

3.4.2. Selección de límite de periodo corto y frecuencia esquina filtro pasa bajo

Tal como se planteó anteriormente, la aplicación de un filtro no corresponde a una corrección, sino a un recorte de cierto contenido de la señal, donde se disminuyen las amplitudes tanto del ruido como de la lectura de movimiento [BB05]. Una operación usual realizada dentro del procesamiento de registros de aceleraciones para estudios de ingeniería sísmica corresponde a la aplicación de un filtro pasa bajo entre los 21 [Hz] y los 25 [Hz]. La progresiva utilización de acelerómetros más modernos para el registro de movimientos superficiales durante terremotos ha permitido evaluar los efectos que tienen estas disminuciones del contenido de alta frecuencia en los valores calculados del espectro de respuesta de aceleraciones [AKYB11, DB11, BG14]. Si bien es recomendable mantener la aplicación del filtro acausal *Butterworth* pasa bajo de cuarto orden a los 25 [Hz] para registros análogos de instrumentos

SMA-1 y QDR, producto de sus limitaciones, los instrumentos digitales más modernos no poseen una limitación que justifique su utilización. Poder proyectar con precisión aceleraciones para frecuencias mayores a 30 [Hz] y PGA resulta útil para estudios de ingeniería particulares, como efectos sobre maquinarias y componentes rígidos no estructurales en general [BB05].

Para ejemplificar los efectos que genera la aplicación de un filtro pasa bajo sobre el valor del PGA de la señal procesada, se consideran dos casos de diferentes comportamientos y que poseen el mismo tipo de instrumento digital ETNA: la estación TOCP en su componente NS y la estación MEJI, ambas para el terremoto de Tocopilla 2007. La Figura (3.11) muestra, para ambas estaciones, el porcentual del PGA del registro filtrado con frecuencias de esquina que van desde 0.01 [Hz] hasta 99 [Hz] respecto al PGA del registro no filtrado pero corregido en su línea base. Cada curva representa la disminución del PGA al aplicar filtros acausales Butterworth de tres valores diferentes de orden. Según la Figura (3.11), el PGA en la estación TOCP tendría una disminución mayor a un 20 % si se aplicase un filtro pasa bajo a los 25 [Hz], como se recomienda realizar para registros análogos, mientras que para la estación MEJI, la disminución sería menor a un 5 %. Las diferencias identificadas se explican por dos motivos principales: las características del suelo donde se ubica el instrumento y la distancia a la fuente sísmica.

Respecto a los efectos de diferentes de tipos de suelo, los suelos blandos de periodo predominante largo, como el de la estación MEJI, pueden llegar a filtrar de forma natural amplitudes de onda de alta frecuencia [DB11], mientras que las rocas rígidas, como el sitio de la estación TOCP, reproducen de forma más íntegra el movimiento de altas frecuencias. Por otro lado, tal como se verá en el Capítulo 6, las ondas de movimiento de alta frecuencia poseen una atenuación más rápida con la distancia que las de frecuencias más bajas. La estación TOCP se encuentra a 39 [km] del punto más cercano al área de ruptura del terremoto de Tocopilla 2007, mientras que la estación MEJI a 32 [km], por lo que el efecto de la diferencia de suelo es predominante en este caso para explicar los diferentes efectos de la aplicación de filtros pasa bajo. La Figura (3.12) muestra los FAS de los registros de aceleración de ambas estaciones corregidos por línea base (*no mean*), donde es posible identificar una pendiente, relacionada con el coeficiente de atenuación de suelos k_o [DB11], mucho más pronunciada en el caso de la estación MEJI.

La Figura (3.13) muestra la misma forma de evaluar la pérdida de aceleración máxima para el mismo registro de la estación MEJI, ahora para valores del espectro de respuesta de aceleraciones (SA) a un 5 % de amortiguamiento de osciladores de frecuencias naturales de 20, 50 y 70 [Hz]. Para filtros pasa bajo de frecuencias de esquina que van desde 99 [Hz] a 50 [Hz], el oscilador de 70 [Hz] sufre la mayor de las disminuciones por filtros de hasta 50 [Hz]. Para frecuencias de esquina desde 50 [Hz] hasta 20 [Hz], la mayor disminución es para el oscilador de 50 [Hz]. Finalmente, las frecuencias de esquina más bajas, que implica una pérdida de todo el contenido de frecuencias cercano y superior a las frecuencias naturales de cada oscilador, los niveles de pérdidas se van estrechando entre las tres curvas. Este comportamiento es coherente con la función de transferencia de osciladores de un grado de libertad vista en la Figura (3.6), donde su forma genera una respuesta que depende en gran parte de las excitaciones con frecuencias menores y cercanas a la vecindad de su frecuencia natural.

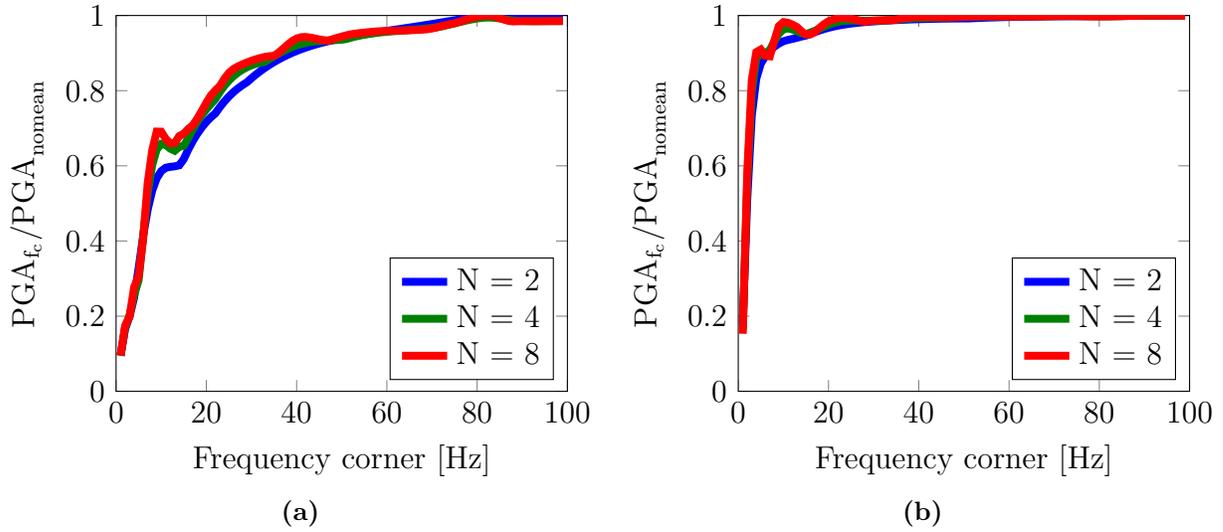


Figura 3.11: Pérdida de PGA al utilizar filtros pasa bajo de diferente orden N y distintas frecuencias de esquina f_c en la componente NS de los registros de aceleraciones del terremoto de Tocopilla 2007 en las estaciones **(a)** TOCP y **(b)** MEJI. El efecto se mide respecto al PGA del registro sin filtrar (PGA_{nomean}).

Podemos concluir que los filtros pasa bajo no afectan de igual forma a todos los valores del espectro de respuesta, que representan las respuestas máximas de diferentes osciladores de un grado de libertad, generando pérdidas significativas cuando la frecuencia de esquina es menor o similar a la frecuencia natural del oscilador, siempre y cuando el registro tenga características similares al de TOCP Tocopilla 2007: una combinación suficiente de un sitio de roca rígida y cercano a la fuente sísmica. Para evaluar de manera sencilla y sin ambigüedades la certeza de esta condición, *Boore y Goulet* [BG14] realizan un estudio respecto a los efectos de la aplicación de filtros *anti-aliasing*⁷ en los valores del espectro de respuesta. Una de las conclusiones principales que obtienen, es que si la amplitud máxima del FAS es 10 veces más grande que la amplitud del FAS en la frecuencia f_a justo donde comienza el decaimiento de señal producto de la aplicación de un filtro pasa bajo, la pérdida de señal asociada a su aplicación no repercute de manera significativa en los valores del PGA o de algún punto del espectro de respuesta. Este resultado se basa en que el contenido de baja frecuencia del terremoto, donde el FAS suele ser máximo, posee una amplitud muy superior respecto al contenido de frecuencias mayores a f_a , que controla la respuesta máxima incluso de osciladores rígidos con $f_n > f_a$. Considerando que las amplitudes de alta frecuencia poseen un comportamiento monótono decreciente, aumentos de amplitudes de frecuencias mayores a la frecuencia f_{10} donde la amplitud del FAS es justo diez veces menor al máximo corresponderían a ruido. En consideración de esto último puede ser recomendable, aunque no obligatorio, aplicar siempre un filtro pasa bajo que inicie su decaimiento justo en f_{10} . *Boore y Goulet* recomiendan inspeccionar caso a caso y filtrar sólo en aquellos donde sea evidente la presencia de ruido.

⁷Corresponden a filtros pasa bajo utilizados para reducir ruido de alta frecuencia al momento de realizar la conversión análoga-digital de instrumentos digitales modernos. Se aplican en una frecuencia cercana a la frecuencia de *Nyquist*, que corresponde a la frecuencia máxima teórica que puede registrar el instrumento y se calcula como la mitad de la tasa de muestreo.

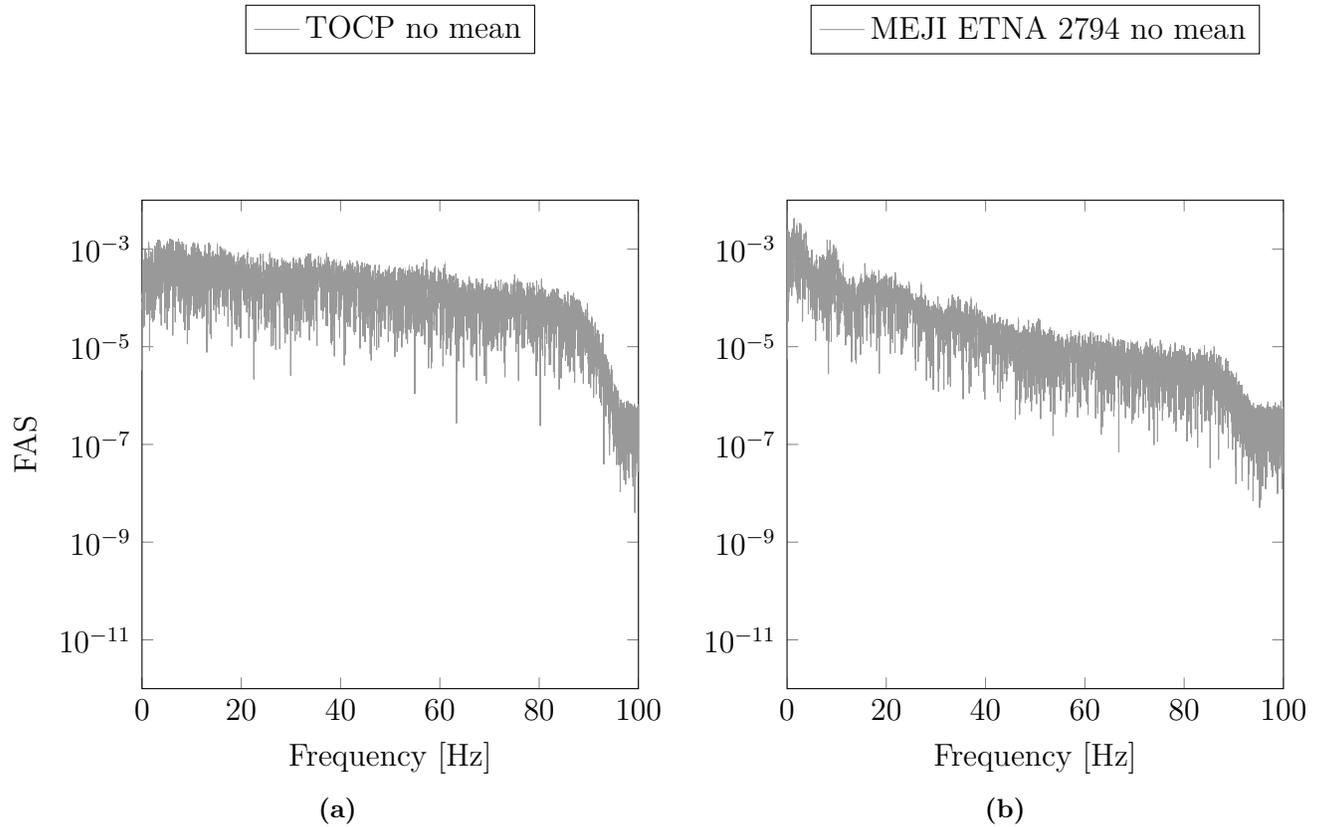


Figura 3.12: Espectro de amplitud de Fourier (FAS) del registro de aceleraciones sin filtrar para la estación (a) TOCP y (b) MEJI.

En conclusión, para evaluar la necesidad de filtrar el ruido de alta frecuencia en registros digitales, se determina la primera frecuencia⁸ para la cual el valor del FAS dividido con la amplitud máxima del FAS es mayor a 10. Si dicha frecuencia es menor al 80 % de la frecuencia de Nyquist, no se aplica ningún filtro pasa bajo. Se selecciona el 80 % de la frecuencia de Nyquist como una representación conservadora del punto donde inicia el decaimiento del filtro anti-aliasing. Adicionalmente se revisan los equipos digitales con frecuencias naturales menores a la frecuencia de Nyquist y se verifica que el valor máximo de la amplitud del FAS en el f_n del sensor sea menor a 10 veces la amplitud máxima del FAS, lo que se cumple en todos los casos observados. La situación en que no existe una frecuencia menor al 80 % de la frecuencia de Nyquist donde $R_{FAS} > 10$, puede significar dos cosas: (1) que el filtro anti-aliasing ha recortado una parte significativa de señal de alta frecuencia que altera los valores del espectro de respuesta para osciladores rígidos o (2) que la amplitud de la señal del terremoto es débil y se ha perdido en el ruido de fondo antes de la frecuencia de aplicación del filtro anti-aliasing. En estos casos hay autores que recomiendan descartar el registro completo [AKYB11], mientras que otros sugieren que para el caso (2) se aplique un filtro pasa bajo en la frecuencia donde inicia el ruido de fondo y que junto a los registros del caso (1) se utilicen completos, considerando que si bien se genera una disminución del PGA y valores espectrales para alta frecuencia, no generarán una gran influencia mientras estos casos sean

⁸Recorriendo desde la frecuencia para la cual el FAS es máximo hacia la frecuencia de Nyquist o frecuencias altas.

pocos relativos al total [BG14]. Del total de 1176 registros que posee inicialmente la base de datos a procesar, se identifican 30 registros dentro de ésta condición, donde la mayoría corresponden a eventos de magnitudes $M_w < 6$. Si bien no constituye una mayor influencia al ser un número reducido de datos, se descartan todos los cuales se identifican dentro de la causalidad (2) y se mantienen los de la causalidad (1) mientras posean RFAS cercano a 10.

En el caso de los registros análogos, que ya han sido filtrados en 25 [Hz], se evalúa la relación entre la máxima amplitud del FAS con la amplitud del FAS en 20 [Hz]. Si ésta es mayor a 10, se considera que se puede calcular con seguridad cualquier valor de alta frecuencia del espectro de respuesta. En caso contrario, se considera que la pérdida de señal es considerable y el registro no se utiliza para la determinación de curvas de atenuación. Sin embargo, considerando que es posible asumir niveles de pérdidas similares en las tres componentes del registro, se acepta su utilización para cálculo de razones H/V en el capítulo 5 limitando su validez a periodos más largos que 0.04 [s].

La Tabla (A.3) muestra los parámetros utilizados en el procesamiento de registros de aceleración de la componente de cada registro, mientras que la Tabla (3.7) muestra un resumen del procedimiento empleado.

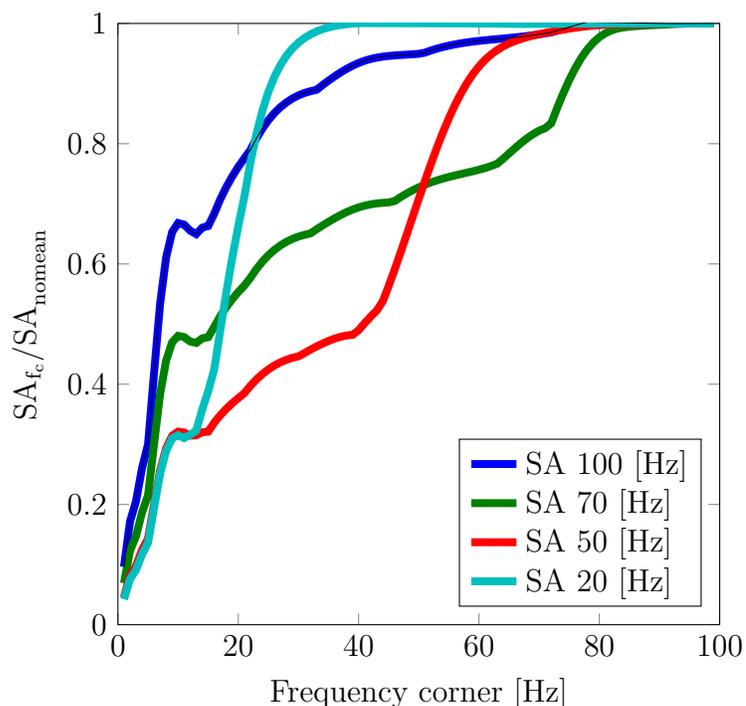


Figura 3.13: Efecto sobre el espectro de respuesta de aceleraciones (SA) para diferentes frecuencias: Comparación de efectos de filtros de diferentes límites altos sobre el valor del SA para 100, 70, 50 y 20 [Hz]. El registro corresponde a la componente NS de TOCP para el terremoto de Tocopilla 2007.

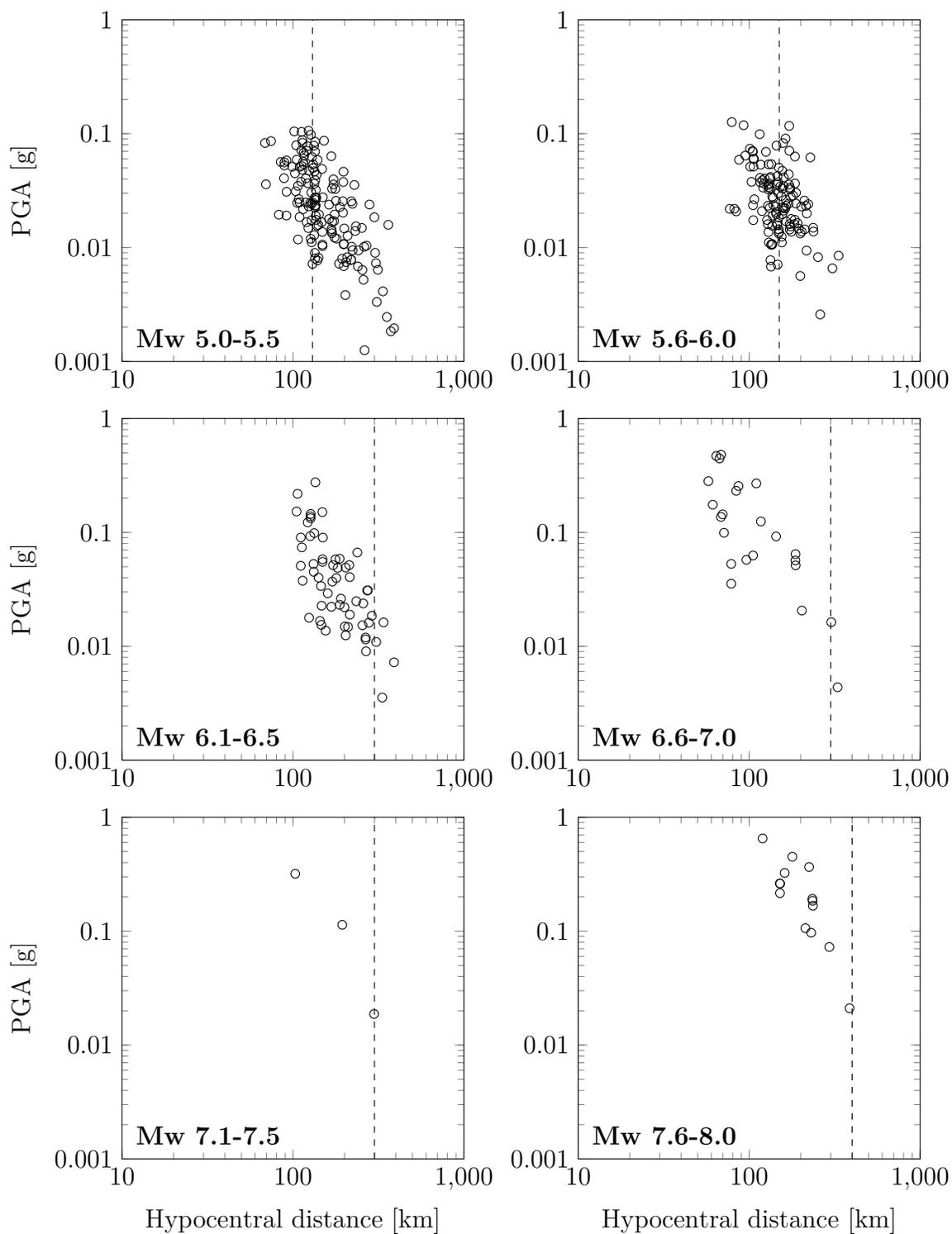


Figura 3.14: Distancias al hipocentro versus PGA para eventos intraplaca agrupados por su magnitud.

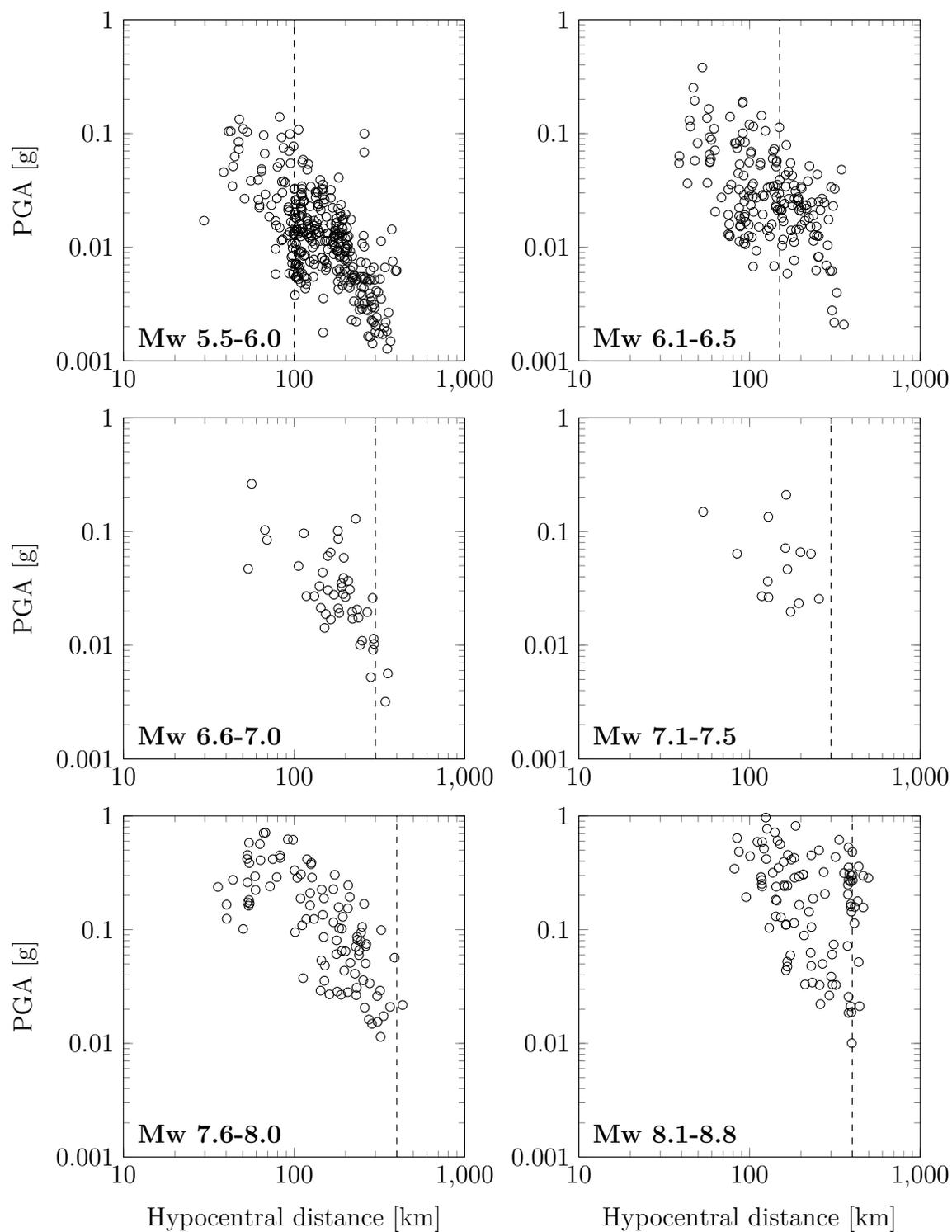


Figura 3.15: Distancias al hipocentro versus PGA para eventos interplaca *trust* agrupados por su magnitud.

Tabla 3.7: Resumen de los pasos utilizados para procesar la base de datos de registros de aceleración de terremotos chilenos.

input:	Registro de aceleración no procesado obtenido directamente de la administración de la red.
1:	Corrección de línea base con información de pre evento cuando está disponible.
2:	Corrección de línea base con información de todo el registro.
3:	Tapper coseno de longitud total 5%.
4:	Series de ceros de longitud total 60 [s]. Elección de f_c y aplicación de filtro <i>Butterworth</i> acausal pasa alto según tipo de instrumento. Cálculo del límite máximo de T
5:	utilizable. Los valores de f_c por tipo de instrumento se indican en la Tabla (3.6). Cuando corresponda, elección de f_c y aplicación de filtro
6:	<i>Butterworth</i> acausal pasa bajo. Cálculo del límite mínimo de T utilizable.

3.5. Muestra de contenido final

Los valores de aceleración máxima para cada registro (PGA) se muestran en la Figura (3.14) para terremotos intraplaca y la Figura (3.15) para terremotos interplaca, según la distancia al hipocentro del evento respectivo. En ambos casos se han agrupado los datos según rangos de magnitud M_w . Para terremotos intraplaca, en general la cantidad de datos disponibles disminuye a medida que aumenta la magnitud, contando con solo dos eventos de magnitud superior a 7.0. En el caso de sismos interplaca, si bien la cantidad de datos es mayor para magnitudes pequeñas, existe una cantidad importante de datos sobre magnitud 8.0, que incluyen los recientes eventos de Maule 2010 $M_w = 8.8$, Iquique 2014 $M_w = 8.2$ e Illapel 2015 $M_w = 8.3$. La situación más crítica en este caso corresponde al rango de magnitudes 7.1-7.5, donde se registran pocos eventos.

Para la construcción de las Figuras (3.14) y (3.15) se ha utilizado la distancia al hipocentro de cada evento, mostrando una primera impresión de la atenuación de los movimientos superficiales generados por terremotos de diferentes magnitudes y mecanismos. Sin embargo, estas Figuras constituyen una referencia inicial, pues como se verá en el Capítulo 4, resulta más apropiado utilizar otras definiciones de trayectoria para eventos interplaca de grandes magnitudes, que implique la consideración de sus fuentes sísmicas extendidas sobre una región o área y no concentradas en un solo punto.

La Figura (3.16) muestra todos los datos de PGA respecto a la distancia al hipocentro para terremotos intraplaca (3.16a) e interplaca (3.16b). Es posible identificar que en general datos de magnitudes más grandes se ubican por sobre las amplias dispersiones de cada nube. La Figura (3.17) muestra los 1162 registros de sismos interplaca e intraplaca procesados, a partir de la relación entre la magnitud M_w y la distancia al hipocentro en cada uno de ellos.

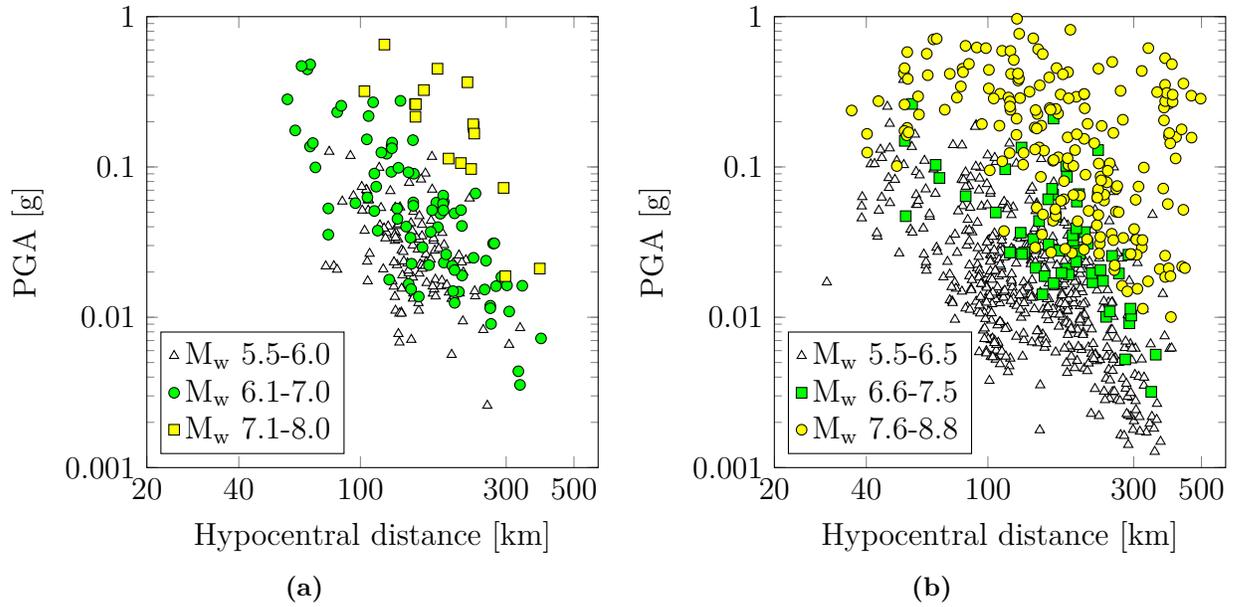


Figura 3.16: Distancias al hipocentro versus PGA para eventos (a) intraplaca y (b) interplaca para diferentes rangos de magnitud M_w .

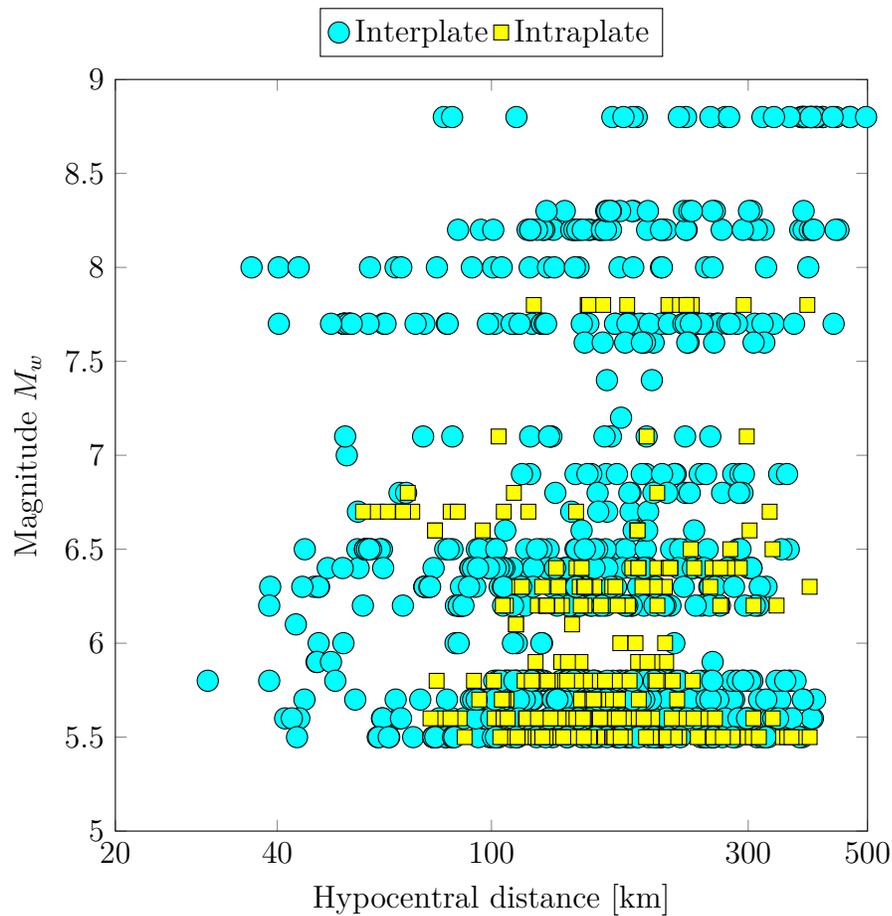


Figura 3.17: Descripción general de los datos procesados de terremotos interplaca e intraplaca en función de la magnitud y la distancia hipocentral.

Capítulo 4

Distancias a la fuente sísmica

En el capítulo anterior se compilaron y procesaron los registros de aceleraciones de tal forma de prepararlos para su utilización como datos de entrada en la derivación posterior de modelos de atenuación para terremotos chilenos interplaca e intraplaca. Tal como se verá en el capítulo 6, una variable influyente en los resultados obtenidos para estos modelos es la medición de la distancia entre el sitio de donde se obtiene la observación a la ubicación de la fuente sísmica que genera la onda que la produce. Si bien hasta el momento se ha utilizado la distancia desde la estación sísmica al hipocentro, no todos los procesos de ruptura asociados a los eventos sísmicos que se utilizan en este estudio, descritos en el capítulo 2, se pueden modelar como fuentes sísmicas puntuales. Grandes terremotos interplaca poseen zonas de grandes extensiones desde las cuales se generan las ondas responsables de los valores máximos del movimiento superficial registrados, lo que impacta en la forma del modelo de atenuación.

Las definiciones más utilizadas de distancias a fuentes sísmicas puntuales son (ver Figura (4.1)):

1. *Epicentral* (R_{epi}): corresponde a la línea recta entre el sitio desde el cual se registra la observación y la proyección en superficie del inicio de la ruptura del evento sísmico.
2. *Hipocentral* (R_{hyp}): la distancia también en línea recta desde el sitio desde el cual se registra la observación hasta el hipocentro o inicio de la ruptura del evento sísmico, considerando su profundidad.

Por otro lado, las definiciones más utilizados de distancias para fuentes sísmicas extendidas son (ver Figura (4.1)):

1. *Joyner-Boore* (R_{JB}): distancia más cercana entre la posición del sitio desde el cual se registra la observación y un punto perteneciente a la proyección en superficie del área del plano de ruptura del evento sísmico.
2. *Área ruptura* (R_{rup}): distancia más cercana entre la posición del sitio desde el cual se registra la observación y un punto perteneciente al área del plano de ruptura del evento sísmico, considerando su ubicación en profundidad.

3. Área asperiza (R_{asp}): distancia más cercana entre la posición del sitio de registro a un punto a las áreas de mayor liberación de esfuerzo.

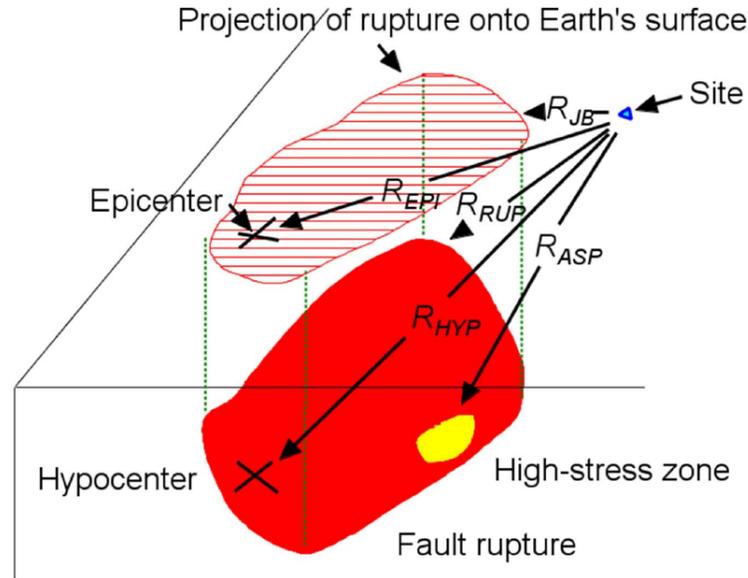


Figura 4.1: Esquema de las definiciones de diferentes distancias utilizadas en ingeniería sísmica [Boo].

Dentro de los estudios de modelos de atenuación de zonas de subducción mejor evaluados por el *GEM* [SDJ⁺15], *Youngs et al.* [YCSH97] y *Zhao et al.* [ZZA⁺06] utilizan la distancia más cercana al área de ruptura para todos los eventos con modelos de falla finita calculados y la distancia hipocentral en caso contrario. En ambos estudios la mayoría de los eventos que no poseen estos modelos son magnitudes bajas o intraplaca, donde las áreas de ruptura son pequeñas y medianas y por lo tanto diferentes definiciones de fuente sísmica, ya sea puntual o extendida, no generan modificaciones demasiado importantes. En el caso de *Atkinson y Boore* [AB03a], se realizan aproximaciones de modelos de falla finita a partir de relaciones empíricas entre magnitud y el área de ruptura [WC94], en los casos que estos no están disponibles. Un criterio similar es utilizado por *Abrahamson et al.* [AGA15].

Como no existen modelos de falla finita para la mayoría de los terremotos chilenos, para los eventos intraplaca utilizados en este estudio, se adopta la solución práctica de considerar la distancia hipocentral como medida de la trayectoria entre la fuente sísmica y el sitio desde el cual se obtiene la observación. Los sismos interplaca se estudian caso a caso, siempre y cuando existan trabajos desarrollados de inversiones de fuente sísmica, situación que se cumple para magnitudes $M_w \geq 7.8$ aproximadamente. En el caso de eventos de magnitudes menores, se utiliza la distancia hipocentral, dejando pendiente para próximas investigaciones la posibilidad de evaluar el efecto de considerar una aproximación del área de ruptura utilizando la magnitud a partir de relaciones empíricas [WC94, PSP⁺04].

4.1. Modelos de ruptura de falla finita

Tal como se ha descrito anteriormente, las ondas dinámicas se generan por el deslizamiento de un bloque sobre otro, fenómeno que se propaga a una velocidad determinada sobre un plano que se denomina área de ruptura. Dentro de este fenómeno complejo, tanto la magnitud como la dirección de la velocidad de la ruptura varían en el tiempo. Es más, los deslizamientos máximos que provoca, que se extienden por una región de tamaño proporcional a la magnitud del evento, tampoco son homogéneos o constantes. Con la intención de modelar de forma simplificada este fenómeno, se utiliza una definición del plano de ruptura para eventos interplaca chilenos formada por un rectángulo cuyo largo se extiende a lo largo del rumbo del contacto entre placas y su ancho a lo largo del manteo. Para su localización dentro de un plano de coordenadas, se utilizan la latitud, longitud y profundidad de su esquina inferior izquierda, vista con orientación de norte a sur (ver Figura (4.2)).

Esta forma de modelar fuentes sísmicas grandes es una de las más utilizadas en la derivación de modelos de atenuación en zonas de subducción. Sin embargo, para los grandes terremotos utilizados en la base de datos de este estudio, no es posible encontrar definiciones de modelos de falla finita más allá de estudios informales o preliminares, como los de la Tabla (4.1) para el terremoto del Maule 2010 y la Tabla (4.2) para el terremoto de Tocopilla 2007. Existen si, para los eventos interplaca más importantes de la región, que poseen aproximadamente $M_w \geq 7.8$, una serie de estudios más completos que incluyen las secuencias completas del terremoto, inversiones de desplazamiento, modelos cinemáticos de ruptura, etc. La Tabla (4.3) muestra una lista de trabajos de este tipo que reportan inversiones de deslizamiento de las fallas de diferentes terremotos chilenos de los cuales se poseen registros de aceleraciones. Para cada evento, es posible asociar áreas dentro de un plano que poseen valores mínimos de deslizamiento al plano de falla donde la roca se fracturó. Considerando el rumbo y manteo del plano de falla, que si no son reportados por el *Global CMT Catalog Search* [DCW81, END12], se obtienen de los mismos trabajos de la Tabla (4.3), en la Tabla (4.4) se proponen áreas de ruptura rectangulares como modelos de falla finita para los terremotos de Chile Central 1985 $M_w = 8.0$, Antofagasta 1995 $M_w = 7.8$, Tocopilla 2007 $M_w = 7.8$, Maule 2010 $M_w = 8.8$, Iquique 2014 $M_w = 8.2$, la réplica del 16 abril de Iquique 2014 $M_w = 7.6$ e Illapel 2015 $M_w = 8.3$.

La utilización de los modelos propuestos como representación de la fuente sísmica por sobre su consideración puntual en el hipocentro, permite generar mejores representaciones de las trayectorias de las ondas emitidas en terremotos interplaca de grandes magnitudes. En estos casos, el hipocentro representa el punto desde el cual se inicia la propagación del deslizamiento producto de la ruptura, sin embargo, su localización no representa de manera acertada el origen de todas las ondas de movimiento generadas. Como ejemplo, la Figura (4.4) muestra las áreas donde tres estudios diferentes identifican deslizamientos para el terremoto de Antofagasta 1995 [RCA⁺96, IR97, DMD⁺97], además del hipocentro y el modelo de área de ruptura propuesto en este estudio. El hipocentro se encuentra ubicado en la esquina superior derecha de un área ruptura de 185 [km] de largo desde la cual se emitieron ondas de movimiento. En este caso extremo pero realista, si se ubicase la fuente sísmica concentrada de forma puntual en el hipocentro, se podría llegar a generar un error de hasta 185 [km] a la hora de estimar la trayectoria de la onda que genera las mayores amplitudes de movimiento

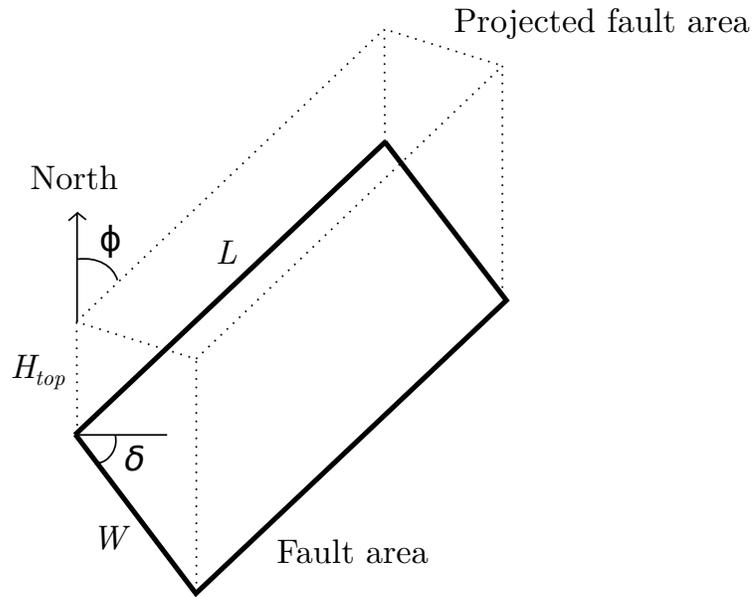


Figura 4.2: Esquema de las coordenadas utilizadas para describir los modelos de falla finita. Se muestra el rumbo (ϕ), el manteo (δ), la profundidad de la esquina inferior izquierda (H_{top}), además del largo (L) y ancho (W) del área de ruptura.

superficial en sitios al sur del área de ruptura.

4.2. Modelos de asperezas: áreas de grandes deslizamientos

Para modelar las características de la fuente sísmica, la utilización de áreas de ruptura sobre concentraciones puntuales resulta en menores errores del cálculo de la distancia fuente-sitio como estimación de la trayectoria de las ondas dinámicas, sin embargo, el método posee limitaciones importantes. Los modelos propuestos en la sección anterior asumen que la ruptura genera ondas de movimiento con amplitud constante dentro del área señalada, lo que si bien aporta simplicidad, es incorrecto desde un punto de vista físico y empírico. En cambio, dentro de la zona donde se produce deslizamiento, existen subzonas de generación de ondas de baja amplitud y otras donde se concentra la generación de ondas de amplitudes máximas, que reciben el nombre de asperezas [RKC⁺10]. En algunos estudios, las asperezas se asocian directamente a las zonas donde se generan los valores de deslizamientos máximos [SIG⁺99]. Considerando que conceptualmente es más correcto relacionar las asperezas con las zonas de mayor liberación de momento sísmico, y que éste es proporcional al producto del deslizamiento y al módulo de corte [SIG⁺99], sus ubicaciones no siempre van a coincidir con las zonas de deslizamientos máximos. Es posible que en un caso hipotético donde se producen grandes deslizamientos en un contacto poco profundo asociado a sedimentos blandos, se generen ondas de mayor amplitud en otra sección del contacto más profunda, de menor deslizamiento y de mayor rigidez [Cam97].

En relación a este último detalle respecto a las asperezas, resulta posible localizar la ubi-

Tabla 4.1: Modelos de falla finita para el terremoto del Maule 2010.

Modelo	Coordenadas de esquina inferior izquierda [°], [°], [km]	Longitud y ancho [km], [km]	Rumbo y manteo [°], [°]	Inversión
<i>Sladen</i> [Sla10]	-37.7125, -74.3183, 9.76	570, 180	18, 18	Telesísmica
<i>Hayes</i> [Hay10]	-37.6790, -74.5829, 1.63	533, 191	17.5, 18	Telesísmica (+broadband SH waveform y long period surface wave)
<i>Shao et al.</i> [SLL+10]	-37.9048, -74.6486, 3.15	612, 214	17.5, 18	Telesísmica

Tabla 4.2: Modelo de falla finita para el terremoto de Tocopilla 2007.

Modelo	Coordenadas esquina inferior izquierda [°], [°], [km]	Longitud y ancho [km], [km]	Rumbo y manteo [°], [°]	Inversión
<i>Sladen</i> [Sla07]	-23.2852, -70.8084, 17.85	161, 127	5, 20	Telesísmica

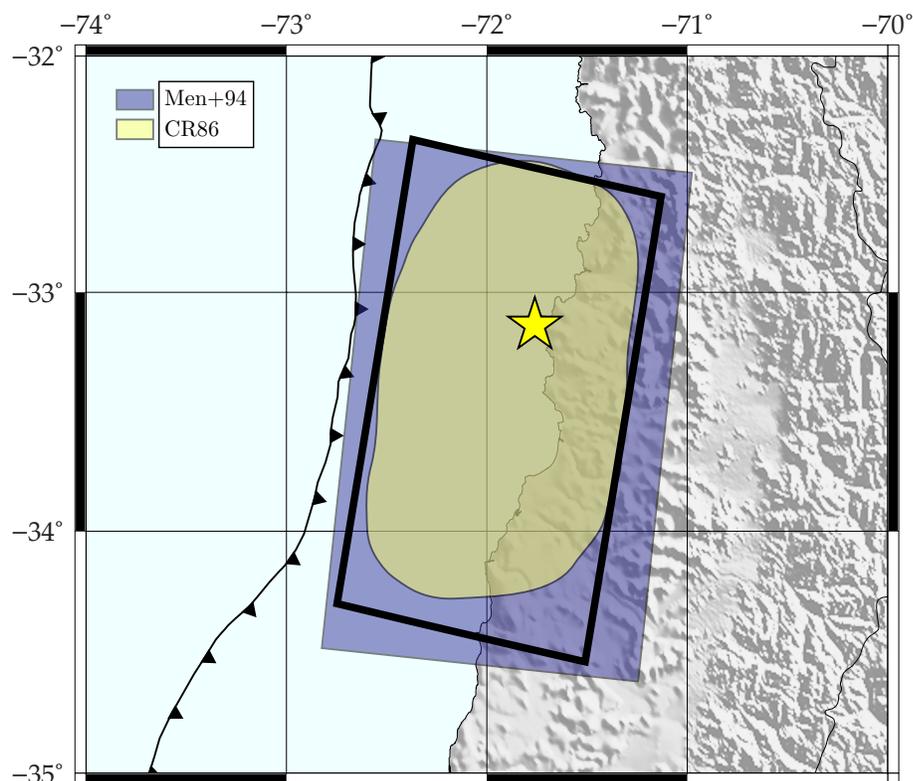


Figura 4.3: Área de ruptura propuesta para el terremoto de Chile Central 1985.

Tabla 4.3: Estudios de fuentes sísmicas para los principales terremotos interplaca chilenos registrados.

Autores	Terremoto
<i>Christensen y Ruff</i> [CR86]	Chile central 1985
<i>Choy y Dewey</i> [CD88]	Chile central 1985
<i>Mendoza et al.</i> [MHM94]	Chile central 1985
<i>Ruegg et al.</i> [RCA+96]	Antofagasta 1995
<i>Ihmlé y Ruegg</i> [IR97]	Antofagasta 1995
<i>Delouis et al.</i> [DMD+97]	Antofagasta 1995
<i>Delouis et al.</i> [DPLM09]	Tocopilla 2007
<i>Peyrat et al.</i> [PMB+10]	Tocopilla 2007
<i>Motagh et al.</i> [MSA+10]	Tocopilla 2007
<i>Schurr et al.</i> [SAR+12]	Tocopilla 2007
<i>Béjar-Pizarro et al.</i> [BPCS+10]	Tocopilla 2007
<i>Delouis et al.</i> [DNV10]	Maule 2010
<i>Lorito et al.</i> [LRA+11]	Maule 2010
<i>Luttrell et al.</i> [LTS+11]	Maule 2010
<i>Tong et al.</i> [TSL+10]	Maule 2010
<i>Vigny et al.</i> [VSP+11]	Maule 2010
<i>Koper et al.</i> [KHLS12]	Maule 2010
<i>Yue et al.</i> [YLR+14]	Maule 2010
<i>Ruiz et al.</i> [RMG+]	Iquique 2014
<i>Hayes et al.</i> [HHB+14]	Iquique 2014
<i>Kato y Nakagawa</i> [KN14]	Iquique 2014
<i>Schurr et al.</i> [SAH+14]	Iquique 2014
<i>Hayes</i> [Hay15]	Coquimbo 2015

Tabla 4.4: Modelos propuestos de áreas de ruptura.

Terremoto	Coordenadas esquina inferior izquierda [$^{\circ}$], [$^{\circ}$], [km]	Longitud y ancho [km], [km]	Rumbo y manteo [$^{\circ}$], [$^{\circ}$]	Figura
Chile Central 1985	-34.30, -72.75	220, 140	11, 26	(4.3)
Antofagasta 1995	-25.00, -71.15	185, 80	6, 22	(4.4)
Tocopilla 2007	-23.25, -70.50	145, 55	2, 20	(4.5)
Maule 2010	-37.80, -74.45	500, 150	19, 18	(4.6)
Iquique 2014	-20.25, -71.00	120, 85	-5, 15	(4.7)
Réplica Iq. 2014		40, 30	-2, 14	(4.7)
Coquimbo 2015	-32.5, -72.5	200, 50	4, 19	

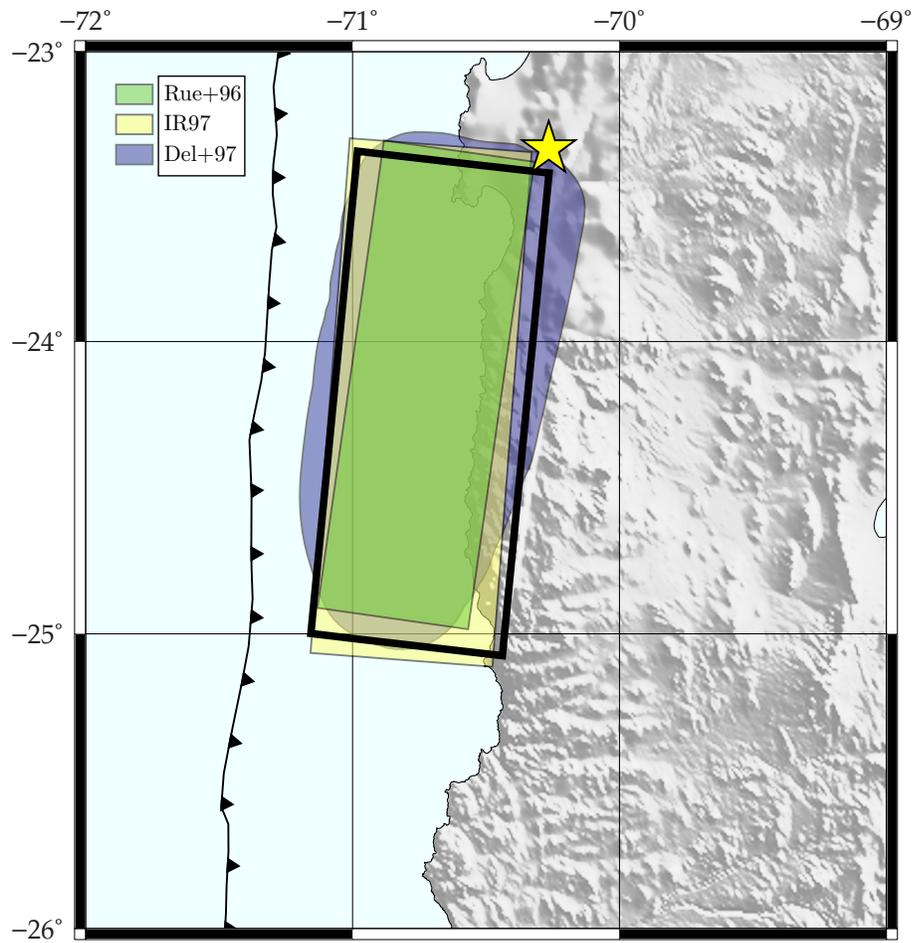


Figura 4.4: Área de ruptura propuesta para el terremoto de Antofagasta 1995.

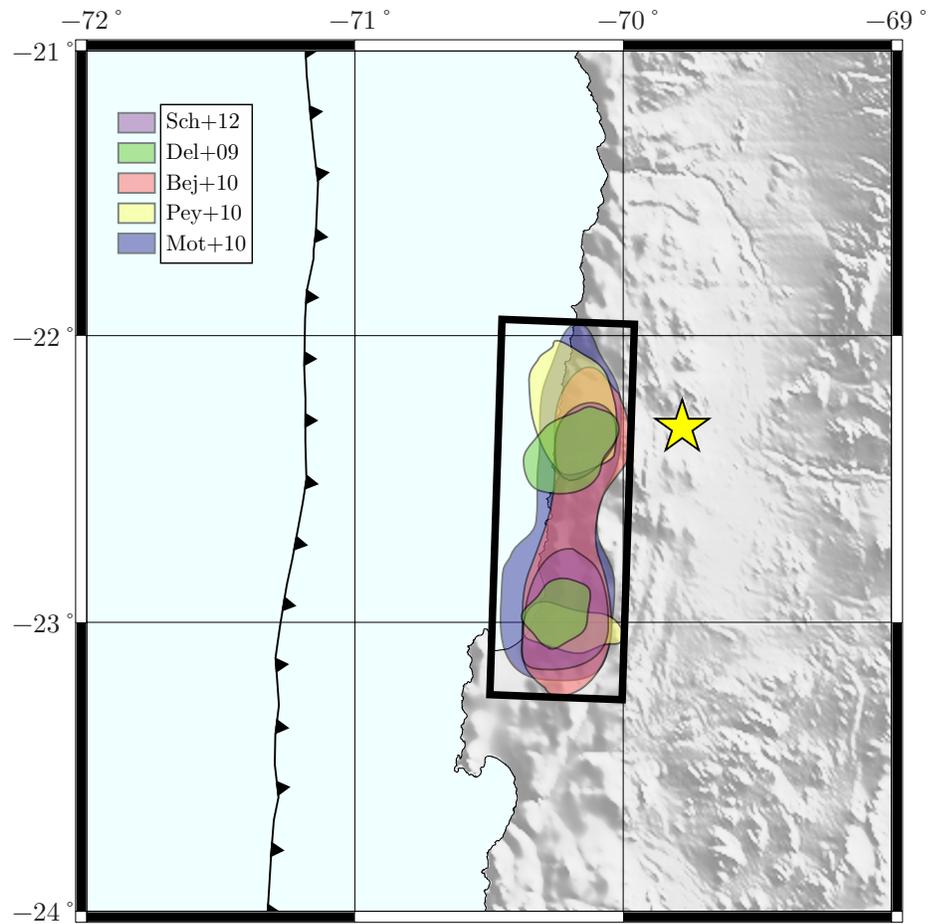


Figura 4.5: Área de ruptura propuesta para el terremoto de Tocopilla 2007.

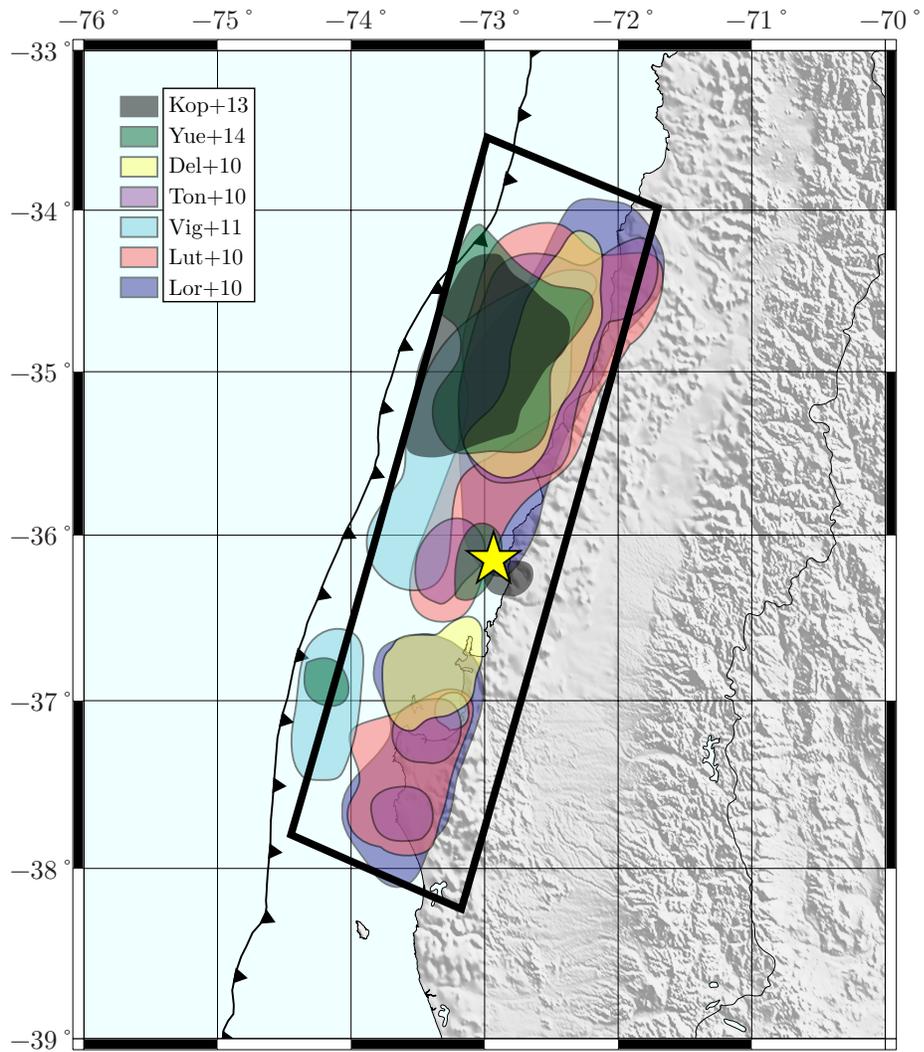


Figura 4.6: Área de ruptura propuesta para el terremoto del Maule 2010.

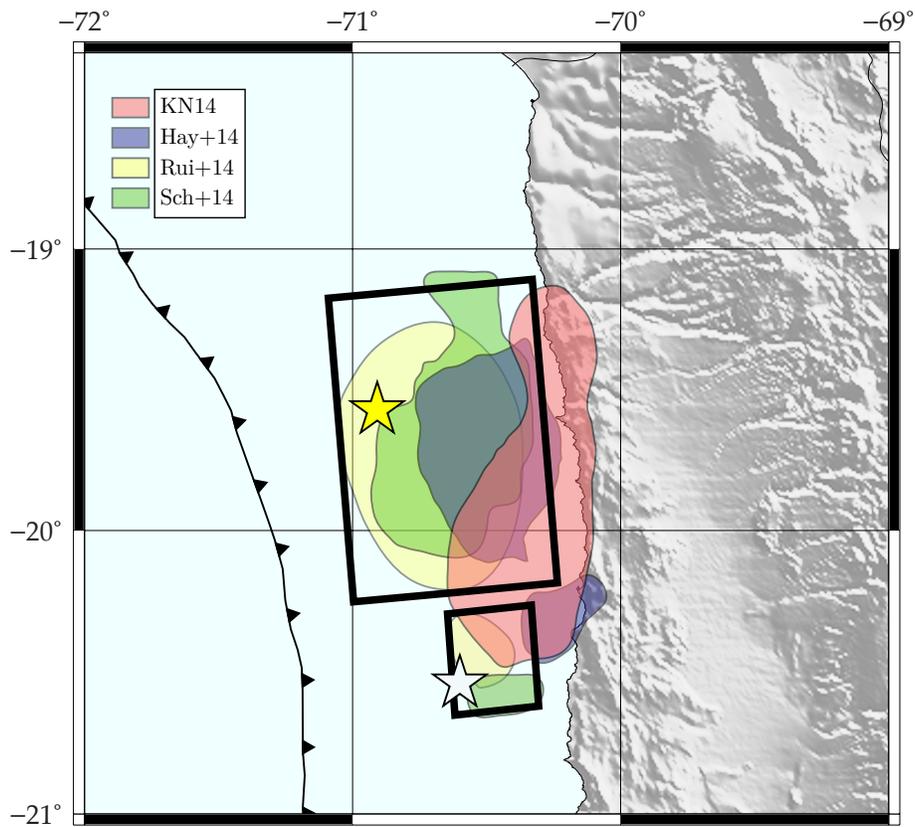


Figura 4.7: Área de ruptura propuesta para el terremoto de Iquique 2014 y su réplica del 3 de abril.

cación exacta de máximos locales de liberación de energía y considerarlos como una fuente sísmica puntual [SB80, RKC⁺10]. A partir de ellas se puede definir un estimador de la trayectoria de las ondas de mayor amplitud al sitio a partir de la distancia a la aspereza puntual más cercana. Otro enfoque similar corresponde a considerar la fuente sísmica extendida como las potenciales zonas, que dentro de un área de ruptura, tienen la capacidad de emitir ondas que contribuyen de manera significativa a la respuesta de osciladores de periodos significativos para la ingeniería sísmica [Cam97]. Como una extensión del trabajo realizado en la sección anterior, utilizando los mismos estudios de la Tabla (4.3), se proponen los modelos de la Tabla (4.5) como subzonas de las áreas de ruptura antes propuestas donde se concentran los mayores deslizamientos. Si bien esta metodología no corresponde de forma exacta a ninguna de las dos descritas, resulta más práctica.

4.3. Distancia más cercana a la fuente sísmica extendida

En base a los modelos de fuente sísmica extendida propuestos en las Tablas (4.4) y (4.5), se construye una grilla de puntos en cada uno de los casos, desde la cual poder evaluar la distancia más cercana a la localización de un sitio cualquiera en superficie. La resolución de la grilla se define directamente en función de la separación de los puntos, obteniendo en todos los casos un valor de 1 [km] aproximadamente. La Tabla (4.6) describe las propiedades del

Tabla 4.5: Modelos propuestos de asperezas: áreas de grandes deslizamientos.

Terremoto	Coordenadas esquina inferior izquierda [°], [°], [km]	Longitud y ancho [km], [km]	Rumbo y manteo [°], [°]	Figura
Chile Central 1985	-33.325, -72.5 -33.3, -71.825 -34.40, -72.35	60, 40 40, 40 60, 40	11, 26	(4.8)
Antofagasta 1995	-24.45, -71.025	100, 40	6, 22	(4.9)
Tocopilla 2007	-22.50, -70.3 -23.21, -70.4	45, 35 50, 40	2, 20	(4.10)
Maule 2010	-35.35, -73.25 -36.3, -73.55 -37.75, -74.05	155, 85 50, 45 100, 45	19, 18	(4.11)
Iquique 2014	-19.95, -70.75	40, 40	-5, 15	(4.12)
Illapel 2015	-31.3, -72.4	40, 20	4, 19	

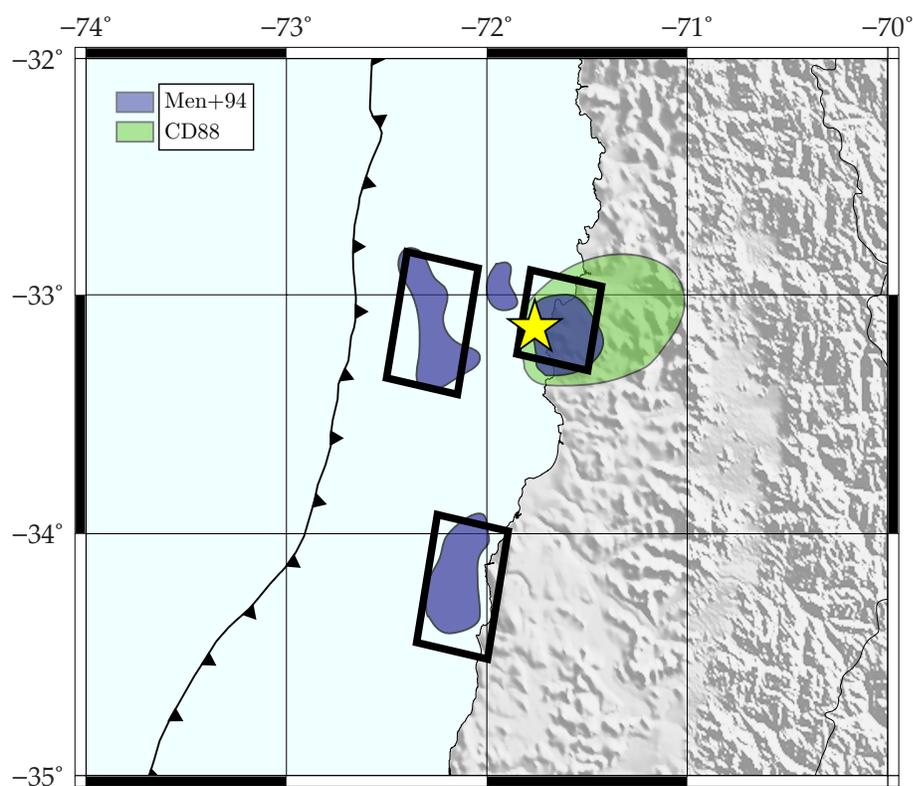


Figura 4.8: Áreas de asperezas de deslizamiento propuestas para el terremoto de Chile Central 1985.

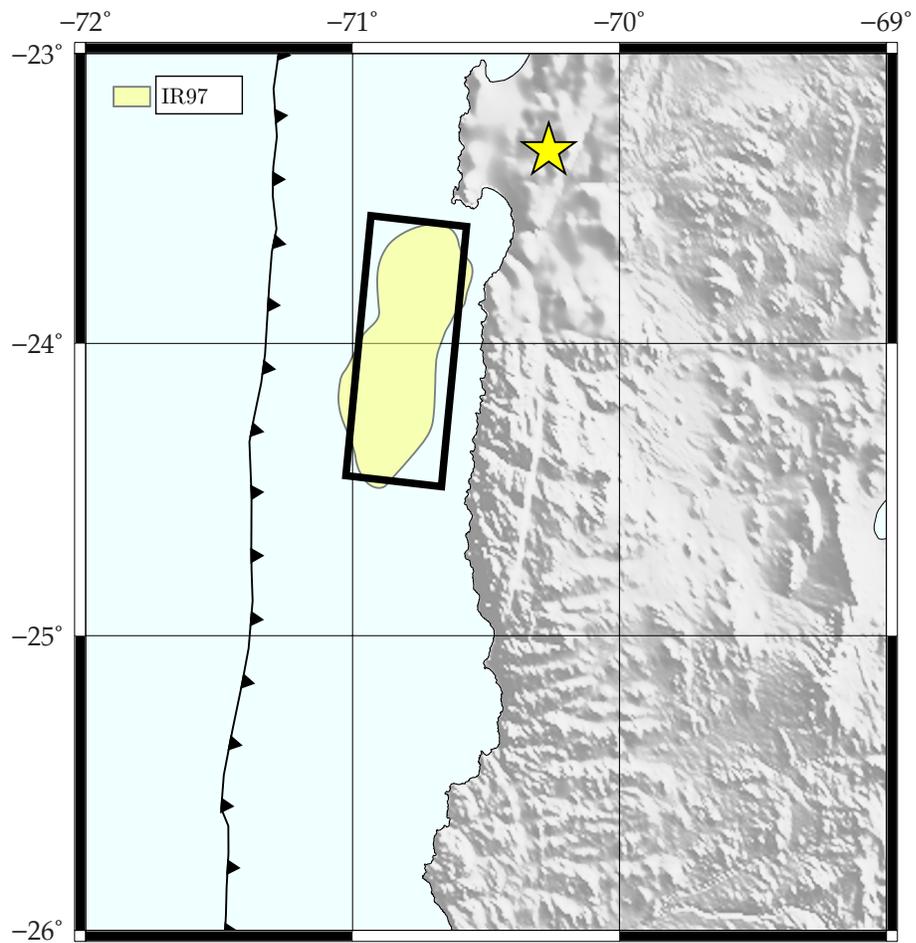


Figura 4.9: Área de aspereza de deslizamiento propuesta para el terremoto de Antofagasta 1995.

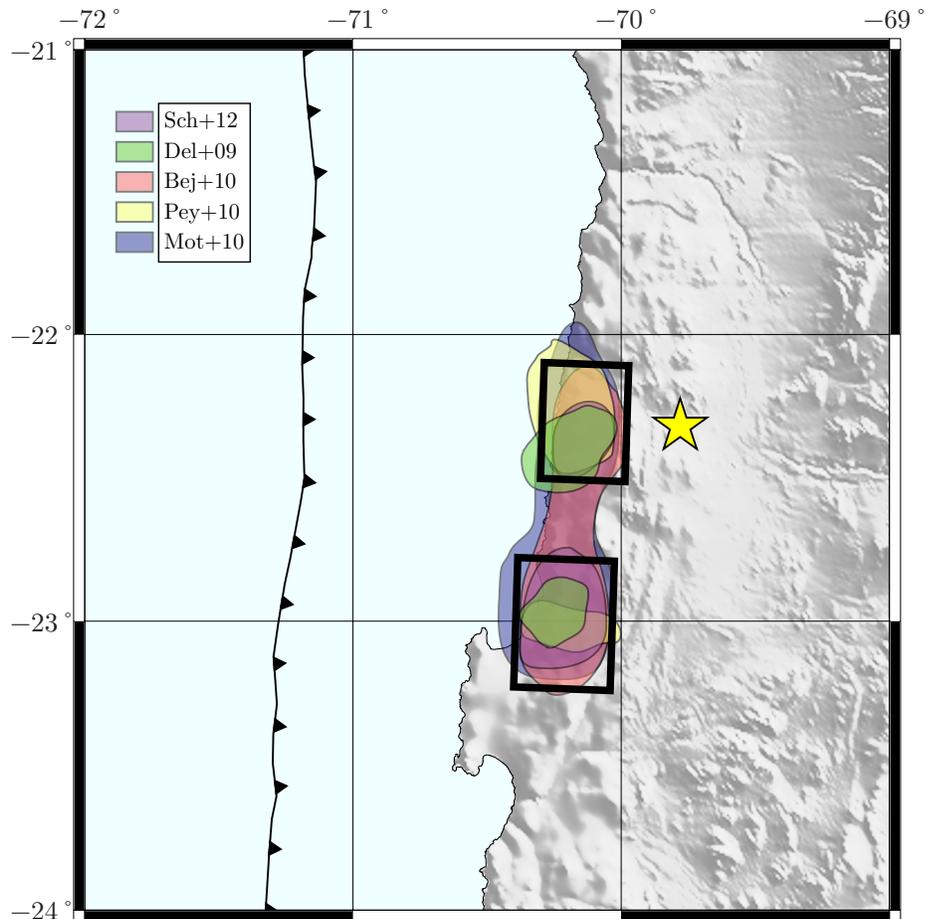


Figura 4.10: Áreas de asperezas de deslizamiento propuestas para el terremoto de Tocopilla 2007.

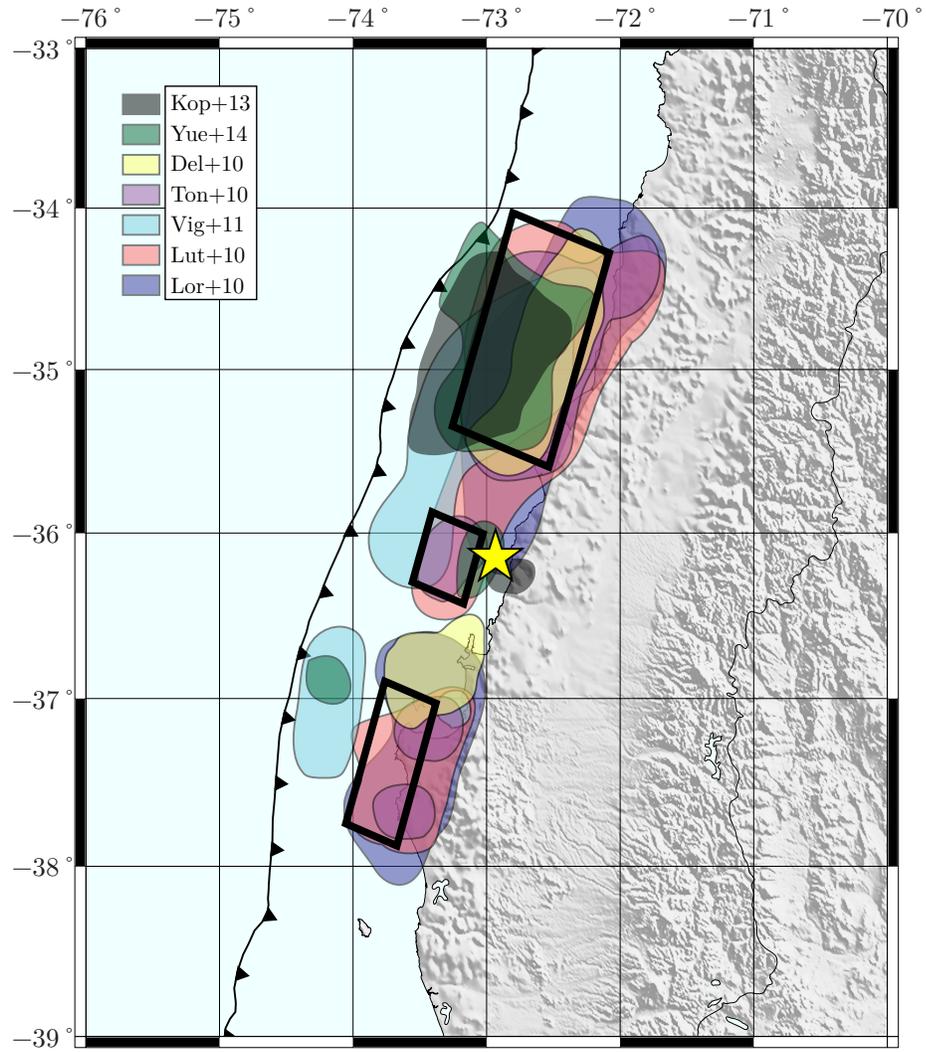


Figura 4.11: Áreas de asperezas de deslizamiento propuestas para el terremoto del Maule 2010.

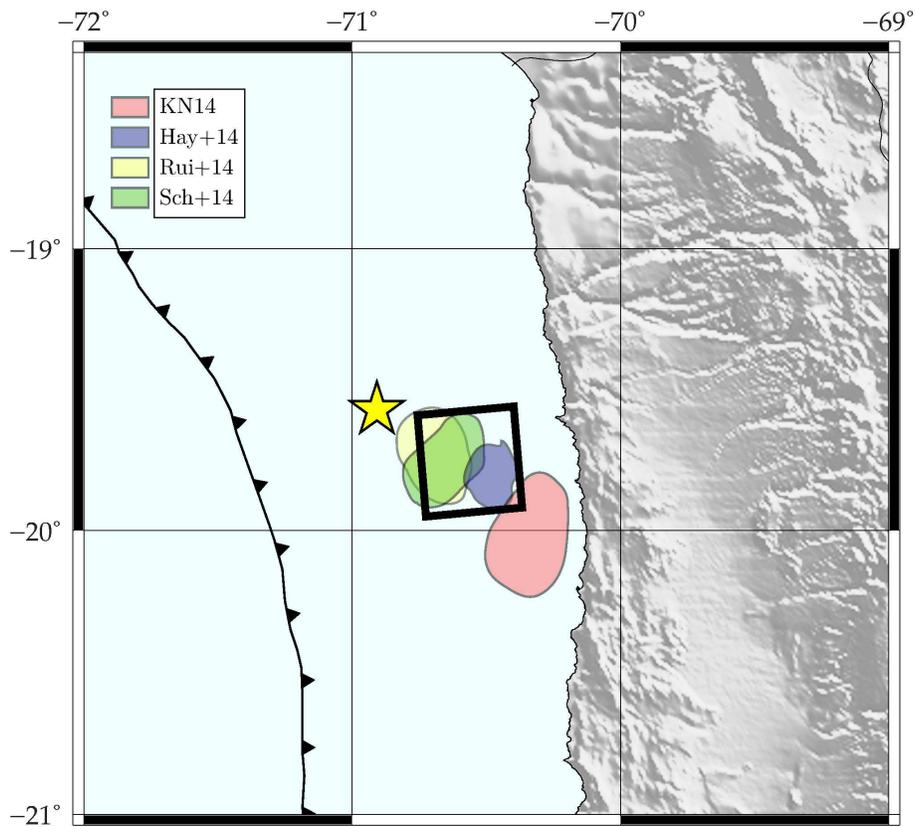


Figura 4.12: Área de aspereza de deslizamiento propuesta para el terremoto de Iquique 2014 y su réplica del 3 de abril.

objeto utilizado en el *software* de la base de datos para la definición de un modelo de falla finita, mientras que la Tabla (4.7) define las propiedades del objeto utilizado para el cálculo de las distancias asociadas a diferentes modelos de representación de la fuente sísmica.

La Figura (4.13) muestra los valores de PGA según la distancia al punto más cercano de la grilla de áreas de ruptura para registros de aceleraciones de terremotos interplaca de M_w 7.6–8.8. No se han incluido terremotos interplaca de magnitudes menores o terremotos intraplaca, pues para ellos se sigue utilizando la fuente sísmica puntual en el hipocentro. Respecto a la Figura (3.15), es posible identificar a simple vista una reducción significativa de la dispersión cuando se utilizan modelos de área de ruptura respecto a fuentes hipocentrales puntuales. La Figura (4.14) muestra los valores de PGA para los mismos eventos respecto a la distancia más corta a un punto de las grillas de asperezas de deslizamiento. Al comparar ambas Figuras, es posible identificar una leve menor dispersión para la distancia a la aspereza, además de un comportamiento más alargado y una evidente curvatura no lineal del decaimiento del PGA con la distancia.

Tabla 4.6: Definición y descripción de propiedades del objeto *modeloff*.

Propiedad	Descripción
<i>Nombre</i>	Código de identificación del evento en formato AAMMDDhhmm.
<i>Largo</i>	Valor del largo en [km] del área.
<i>Ancho</i>	Valor del ancho en [km] del área.
<i>Rumbo</i>	Valor del rumbo en [deg] medido en dirección de apertura N-E.
<i>Manteo</i>	Valor del manteo en [deg] medido en dirección de apertura desde la superficie hacia abajo.
<i>LatIzqInf</i>	Valor en [deg] de latitud de la esquina inferior izquierda del área.
<i>LonIzqInf</i>	Valor en [deg] de longitud de la esquina inferior izquierda del área.
<i>ProfIzq</i>	Almacena y calcula en [km] la profundidad del lado izquierdo del área más cercano a la fosa.
<i>Grilla</i>	Almacena y calcula la grilla de puntos que describe el área, con una resolución aproximada de 1 [km].
<i>Fosa</i>	Ubicación de los puntos de la fosa.

Tabla 4.7: Definición y descripción de propiedades del objeto *distancia*.

Propiedad	Descripción
<i>Hipocentro</i>	Almacena y calcula la distancia a la fuente sísmica puntual referida al hipocentro.
<i>Ruptura</i>	Almacena y calcula la distancia a la fuente sísmica extendida referida a un área de ruptura finita.
<i>AsperezaI</i>	Almacena y calcula la distancia a la fuente sísmica extendida referida a zonas indicadas como asperezas de deslizamiento.
<i>Evento</i>	Indicación práctica de si la señal ha sido o no procesada.
<i>Estacion</i>	Orientación del canal en el cuál se realiza el registro.

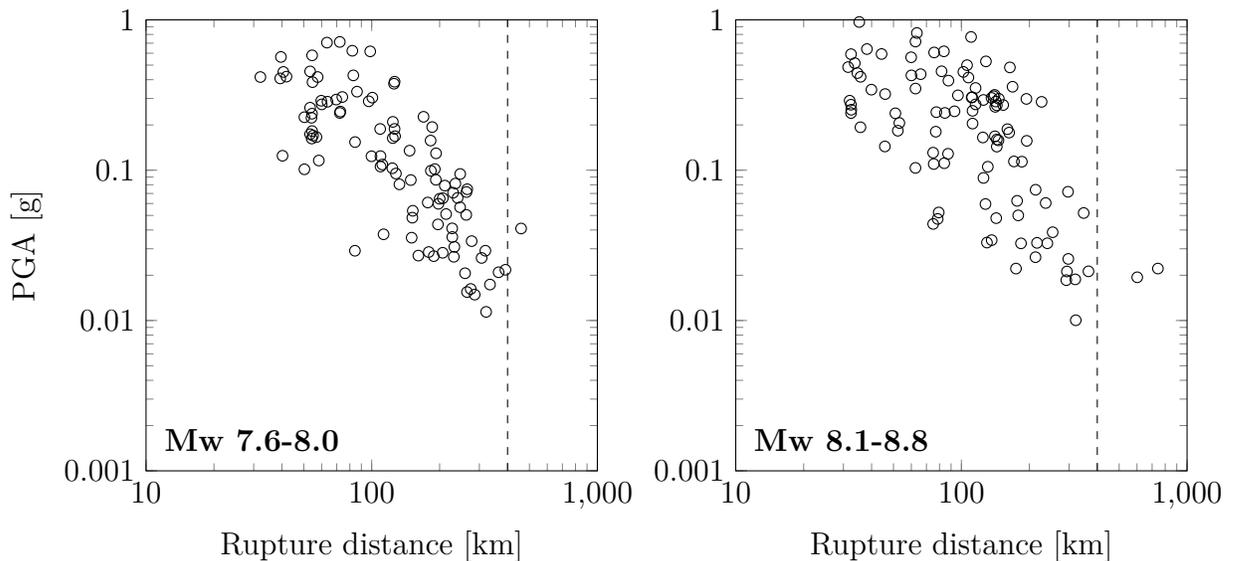


Figura 4.13: Distancias al área de ruptura versus PGA para eventos interplaca *trust* agrupados por su magnitud.

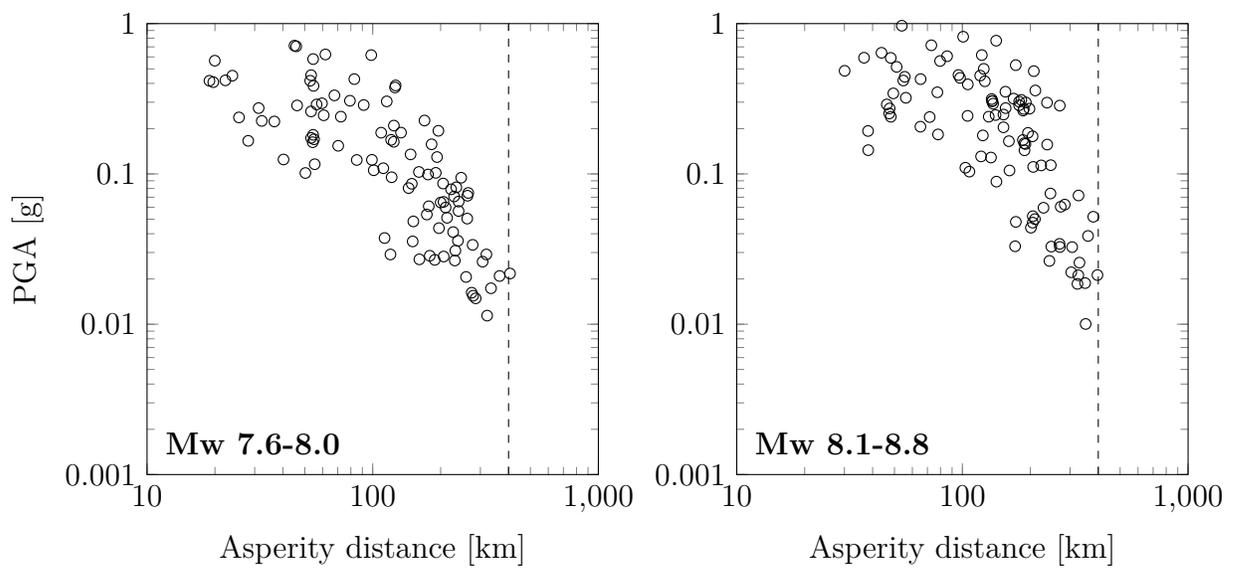


Figura 4.14: Distancia más cercana al área de una aspereza de deslizamiento versus PGA para eventos interplaca *trust* agrupados por su magnitud.

Capítulo 5

Efectos de sitio y clasificaciones

Los terremotos generan diferentes tipos de ondas sísmicas, las cuales se propagan por toda la tierra a diferentes velocidades y amplitudes, que a su vez se ven influenciadas por las condiciones del medio en el que viajan. Cuando estas ondas alcanzan la superficie libre de la corteza terrestre, se producen las manifestaciones de movimiento de tierra que impactan a toda estructura o ser vivo que se encuentre sobre ella. Para poder realizar estimaciones cuantificadas de estos efectos superficiales, se deben estudiar las relaciones entre las observaciones medidas a través de estaciones sísmicas y las causas que explican el movimiento.

En el Capítulo 3 se asume la magnitud momento M_w como medición del tamaño de la fuente sísmica, mientras que en el Capítulo 4 se establece su definición espacial a través de modelos de ruptura de área finita, que permiten definir una medida de distancia entre cualquier punto de la corteza con la zona generadora de las ondas de movimiento. Considerados como un tercer elemento causal, en este capítulo se estudian los fenómenos de amplificación asociados a los efectos de sitio y su relación con el movimiento superficial observado durante un sismo.

Para visualizar de manera general la influencia de dichos efectos, se considera un modelo de tierra simplificado de composición rocosa homogénea, dotada de una superficie terrestre completamente lisa. En una región específica de ella se induce una ruptura asociada a un desplazamiento que da inicio a la propagación de ondas sísmicas. Sin considerar los efectos de polaridad o cinemática específicos del proceso de ruptura, las ondas encuentran condiciones idénticas para propagarse en todas direcciones, por lo que observadores ubicados a la misma distancia de las zonas generadoras de ondas perciben similares intensidades máximas de movimiento superficial.

Desde este punto ideal podemos acercarnos a las características de los escenarios reales y describir los efectos que producen. Cuando incorporamos la topografía o forma del relieve superficial de la corteza, como montañas, mesetas, laderas, pendientes, etc., las ondas pueden amplificarse al quedar atrapadas en ella en el momento que se acercan a la superficie. Ellas se reflejan de manera repetida en la superficie libre, sumándose entre sí y las ondas que siguen incidiendo provenientes de la fuente sísmica. Al incorporar la heterogeneidad de las capas que definen el interior de la tierra, en específico su corteza, sumamos dos fenómenos diferentes

de amplificación [CSG05]. El primero es similar al efecto topográfico, donde las ondas al acercarse a la superficie pueden quedar atrapadas en estratos superficiales de características dinámicas significativamente distintas a las de los estratos o medios colindantes, generando una propagación de onda superficial que se suma a las ya descritas. Tal es el caso de cuencas formadas por depósitos sedimentarios blandos sobre basamentos rocosos rígidos. El segundo fenómeno se da cuando las ondas se acercan a la superficie y se refractan en cada cambio de estrato o cada vez que exista una variación de propiedades dinámicas en la dirección de la propagación. Si bien todos los mecanismos descritos inciden en la intensidad del movimiento superficial que describe un registro de aceleraciones, en este estudio se consideran únicamente modelos relacionados a la refracción en la propagación de ondas sísmicas o amplificación dinámica.

En los estudios empíricos de atenuación del movimiento superficial (GMPEs: *ground motion prediction equations*) para zonas subductivas, existen diferentes formas de representar o modelar la amplificación dinámica. Las más simples realizan una clasificación descriptiva del suelo en función de sus características geológicas superficiales, separando por un lado aquellos sitios de suelos rocosos y duros, donde los niveles de amplificación son bajos o nulos y por otro los sitios de suelos blandos donde los niveles son de medio a alto [YCSH97, GSWY02, RS05, LL08, CB12]. Para cada una de estas clases, se estima un coeficiente al momento de ajustar el modelo de atenuación a las observaciones de movimiento obtenidas de estaciones sísmicas, que representa la amplificación promedio de cada una de ellas y actúa de la forma

$$Y = Y_o S_i \tag{5.1}$$

donde Y_o corresponde al movimiento de la superficie sin considerar amplificación, S al coeficiente de amplificación de la clase i e Y al movimiento de superficie final esperado. Es común dentro de estos estudios fijar el valor de S en 1 para los sitios tipo roca. Un caso de especial consideración corresponde al trabajo desarrollado por *Molas y Yamazaki* [MY95], donde los efectos de suelo se consideran a través de un coeficiente S distinto para cada estación i .

En otros casos se desarrollan clasificaciones con más tipos de suelo que permiten describir en mayor detalle las propiedades dinámicas utilizando indicadores como la velocidad de onda de corte promedio en los primeros 30 metros de profundidad V_{S30} [BJ97, AB03a, SPM⁺13] o el periodo predominante T^* del conjunto de estratos [ZIZ⁺04, ZZA⁺06, FBSD07, ABB⁺12]. Acotados la mayoría de ellos a describir un comportamiento lineal del suelo, *Atkinson y Boore* [AB03a] utilizan factores de reducción de la amplitud del movimiento para representar el comportamiento no lineal cuando las aceleraciones esperadas por su modelo de atenuación en un sitio de referencia superan cierto valor umbral de PGA. Estudios posteriores [CS05] desarrollan esta idea en detalle a partir del ajuste de un modelo de amplificación dinámica de suelos que entrega coeficientes $S(T, V_{S30}, PGA_{ref})$ para un rango amplio de periodos del movimiento superficial, como función continua de V_{S30} y el valor de PGA en un sitio con características dinámicas de referencia.

5.1. Evaluación de la amplificación dinámica

Una explicación teórica del fenómeno de la amplificación dinámica de suelos se puede obtener del concepto de la función de transferencia, aplicable a cualquier oscilador armónico excitado por una forzante $P(t)$. Si la función de transferencia del sistema dinámico es $F(t)$, la respuesta ante la excitación será $u(t) = P(t) * F(t)$, es decir, la convolución en el tiempo de ambas funciones. Por otro lado, la misma respuesta en el espacio de frecuencia, por propiedades de la transformada de Fourier, se determina $\bar{u}(\omega) = \bar{P}(\omega) \cdot \bar{F}(\omega)$, donde \bar{P} y \bar{F} son las transformadas de Fourier de la excitación y la función de transferencia respectivamente. Este esquema es tan general y simple que aplica para explicar la respuesta tanto de los osciladores de un grado de libertad de la Figura (5.1) como el funcionamiento y aplicación de filtros, donde $P(t)$ correspondería a la señal y $F(t)$ a la función del filtro en el tiempo. Para todos estos casos, la función de transferencia describe la modificación que recibe una señal original al atravesar cierto sistema dinámico, convirtiéndose en una nueva señal alterada de diferentes características.

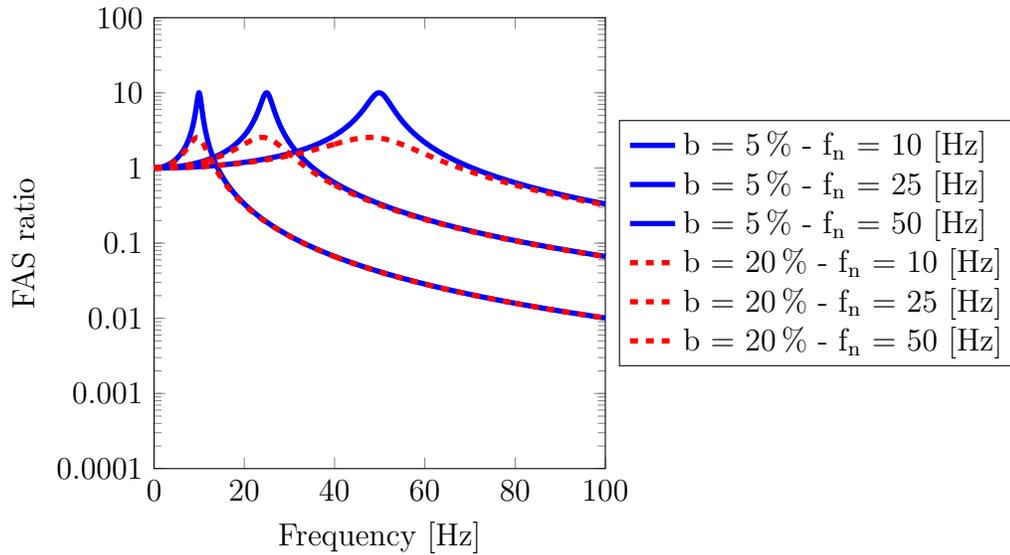


Figura 5.1: Funciones de transferencia teóricas [PKHR12] para osciladores de 1 GDL, bajo diferentes niveles de amortiguamiento β y frecuencia natural f_n . Las frecuencias bajas no se ven afectadas si f_n es suficientemente alta. La mayor amplificación se produce en f_n , cuya amplitud depende de β . Las frecuencias altas se ven disminuidas.

En la situación específica del fenómeno de amplificación dinámica de suelos durante un terremoto, la señal original corresponde al tren de ondas de movimiento que se desplaza desde la fuente sísmica en diversas direcciones a través de la roca. La función de transferencia, que modifica esta señal original en sus amplitudes espectrales, corresponde al efecto de amplificación y depende de las características específicas del sitio en cuestión. La nueva señal alterada es el resultado del proceso y corresponde a la aceleración percibida en la superficie.

Si se considera un modelo simplificado de sólo un estrato de suelo uniforme y amortiguado, ubicado sobre un basamento rocoso de profundidad H , se tiene que la función de transferencia de la amplificación dinámica se puede determinar a partir de un desarrollo algebraico de la

ecuación de propagación de ondas [Kra96], considerando un tren de ondas proveniente del basamento rocoso. Determinadas las soluciones que expresan la respuesta sobre la superficie del suelo y la roca, la función de transferencia y por tanto la amplificación, se puede definir por la razón entre ellas de la forma $F(\omega) = u_{Smax}/u_{Rmax}$. El resultado de este desarrollo [Kra96] se escribe como

$$F(\omega) = \frac{1}{\cos(k^*H) + i\Delta \sin(k^*H)} \quad (5.2)$$

donde $k^* = \omega/V_s^*$ corresponde a un número complejo conocido como número de onda, H representa la profundidad del estrato de suelo y ω la frecuencia angular. Adicionalmente Δ corresponde a otro número complejo, conocido como impedancia, cuya definición para este caso particular de un estrato sobre roca, es $\Delta = k_s^*G_s^*/k_r^*G_r^*$, siendo G^* el módulo de corte complejo respectivo a suelo o roca.

Resulta evidente que (5.2) posee diferentes valores a lo largo del espacio de frecuencia, alcanzando sus valores máximos aproximadamente en los periodos asociados al n modo de vibrar del suelo entendido como sistema dinámico. Esta aproximación es exacta para valores nulos de ξ y Δ , donde lo último implica considerar un basamento rocoso infinitamente rígido. Para ésta situación simplificada los periodos se pueden determinar por

$$T_n = \frac{4H}{V_S(2n+1)} \quad (5.3)$$

donde la velocidad de onda de corte compleja se define $V_S^* = V_S\sqrt{1+i2\xi}$ y ξ corresponde a la razón de amortiguamiento crítico. El periodo fundamental está asociado al valor $n = 0$.

La función de transferencia entre la roca y un suelo puede definirse de dos maneras en función de la ubicación de la roca. La primera considera que la roca se ubica por debajo de la capa horizontal de suelo y corresponde a la definición de la cual se desprenden las ecuaciones que hemos descrito hasta el momento. La segunda definición considera que el movimiento de la roca se evalúa en un afloramiento rocoso superficial, lo que implica diferentes consideraciones matemáticas para las condiciones de borde de la de propagación de ondas. Para esta segunda opción, el valor máximo de la amplificación [DBC⁺00] se puede aproximar por

$$[F(\omega)]_{max} \approx \frac{1}{\Delta + (\pi/2)\xi_s} \quad (5.4)$$

Si bien este modelo es simple y resulta poco probable que muchas situaciones reales se ajusten a él, permite entender las diferentes influencias que tienen las características dinámicas de los suelos en la amplificación dinámica. Como han observado otros autores [DBC⁺00], la localización de la amplificación dentro del espectro de frecuencias se determina por los valores de los periodos asociados al suelo T_n , donde la máxima se da en el periodo fundamental T_o . De forma complementaria, el nivel de la amplificación, cuánto crece la respuesta en la superficie del suelo respecto a la señal original no amplificada en roca, queda determinada por la razón de impedancia Δ en proporción directa y el amortiguamiento ξ en proporción inversa, tal como muestra explícitamente la Ecuación (5.4).

Para situaciones más complejas, este modelo simplificado se puede extender hacia un modelo de múltiples capas de estratos horizontales montados uno sobre otro. En esta situación

general, la razón de impedancia se escribe

$$\Delta = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} = \frac{\omega \sqrt{\rho_m G_m^*}}{\omega \sqrt{\rho_{m+1} G_{m+1}^*}} = \sqrt{\frac{\rho_m G_m (1 + i2\xi_m)}{\rho_{m+1} G_{m+1} (1 + i2\xi_{m+1})}} \quad (5.5)$$

donde ρ representa la densidad del suelo respectivo, considerando que la capa m se encuentra sobre la capa $m + 1$. Lo mismo se puede representar ahora en función de V_S

$$\Delta = \frac{\omega \rho_m V_S s_m^*}{\omega \rho_{m+1} V_S s_{m+1}^*} = \frac{\rho_m V_S s_m (1 + i\xi_m)}{\rho_{m+1} V_S s_{m+1} (1 + i\xi_{m+1})} \quad (5.6)$$

donde las observaciones respecto al efecto de T_o y Δ en relación a la amplificación dinámica no cambian significativamente.

Siendo la razón de impedancia un valor poco directo de observar como para considerarlo un buen indicador del nivel de amplificación, *Dobry et al.* [DBC⁺00] logra determinar una correlación directa entre Δ y $1/V_S$, medido este último para cada sitio como el valor promedio representativo de la velocidad de onda de corte en los primeros 30 metros en profundidad, parámetro conocido como V_{S30} . Por (5.6) se puede ver que dicha correlación es válida mientras las variaciones de ρ entre estratos no sean demasiado significativas en comparación a las de V_S . Adicionalmente requiere que el valor de ξ se mantenga constante, situación que se cumple aproximadamente mientras el sitio se comporte de manera lineal [DBC⁺00].

Por su parte, la medición de V_{S30} se puede realizar a través de diferentes técnicas geotécnicas instrumentales. Desde determinaciones del perfil de velocidad de onda de corte de manera directa con ensayos *standard penetration test* (SPT), hasta opciones que no implican perforación como *multichannel analysis of surface waves* (MASW) donde el perfil se deduce utilizando mediciones de propagación de ondas superficiales. Respecto a la determinación del periodo fundamental T_o , *Nakamura* [Nak89] desarrolla una técnica geotécnica instrumental a partir de la medición de microvibraciones en la superficie del sitio. Relacionando las componentes horizontales con la vertical en sus formas espectrales, identifica el valor de amplitud máxima como la frecuencia o periodo predominante T^* .

A continuación se busca derivar factores de amplificación dinámica a partir de dos parámetros. Uno de ellos es el V_{S30} , considerado como un indicador de la razón de impedancia [DBC⁺00], que a su vez se relaciona de manera directa a la amplitud máxima de la amplificación considerando un amortiguamiento constante del suelo. El otro parámetro es el periodo predominante T^* , es decir, el periodo de vibrar asociado a la participación modal mayor, que a su vez indica el rango de periodos donde se focaliza la mayor amplificación dinámica.

5.1.1. Determinación de periodos predominantes

En la misma dirección que estudios previos [ZIZ⁺04, ZZA⁺06, FBSD07, ABB⁺12], se utilizan las razones espectrales H/V a un 5% de amortiguamiento obtenidas a partir de registros sísmicos para estimar la función de amplificación del suelo en cada estación respectiva. Los principios generales que justifican esta técnica, son similares a la serie de supuestos expuestos por *Nakamura* [Nak89] que validan un análisis similar a partir de datos de microvibraciones

ambientales. En primera instancia se considera que como consecuencia de la refracción continua que sufren las ondas de cuerpo desde que son emitidas, al llegar a superficie su ángulo de incidencia es completamente vertical. Esto implica que en el movimiento horizontal Y_h se verá la acción únicamente de ondas de cuerpo S_h , mientras que en el vertical sólo de ondas de cuerpo P . En el caso de las ondas superficiales, se considera que el efecto de las ondas *Rayleigh* es igual para las componentes horizontales y verticales Y_v del movimiento. De manera esquemática, ambas componentes del movimiento superficial se pueden describir por

$$\begin{aligned} Y_h &= L \cdot R \cdot S_h \\ Y_v &= R \cdot P \end{aligned} \quad (5.7)$$

donde L representa la acción de las ondas superficiales *Love*. La función de amplificación del suelo corresponde a la relación espectral S_h/Y_{ho} , donde Y_{ho} representa el movimiento horizontal en el basamento rocoso. Considerando como supuestos adicionales que el movimiento en el basamento no posee una dirección predominante y que las ondas superficiales no alcanzan gran amplitud, se puede escribir que $Y_{ho} = Y_{vo} = P$ y que el movimiento superficial vertical contiene el efecto de las ondas *Rayleigh* y el movimiento vertical del basamento de la forma $Y_v = R + Y_{vo}$. En conclusión, la razón H/V de movimientos superficiales se puede describir de manera descriptiva como

$$H/V = \frac{Y_h}{Y_v} = \frac{L \cdot S_h}{Y_{ho}} \quad (5.8)$$

Cuando $L \approx 1$ (ondas *Love* débiles), la razón espectral H/V puede aproximarse a la función de amplificación del sitio si se cumplen los otros supuestos. Mientras más cercana a la superficie se genere la ruptura de un evento sísmico, las ondas *Love* alcanzan mayores niveles de amplitud [CSG05] y la técnica entrega peores resultados. Lo mismo ocurre para registros de movimientos obtenidos a distancias demasiado lejanas a la fuente sísmica, donde por cada unidad de distancia recorrida la relación de amplitudes entre las ondas superficiales y las de cuerpo aumenta.

Las relaciones espectrales H/V se calculan a partir del espectro de respuesta de aceleraciones a un 5% de amortiguamiento tal como hace *Zhao et al.* [ZIZ⁺06], considerando H como la media geométrica entre ambas componentes horizontales. Su rango de periodos de validez para cada registro que queda determinado por el análisis de procesamiento de acelerogramas realizado en el Capítulo 3. El total de datos utilizados considera sismos de $M_w = 5.5 - 8.8$ para interplaca y $M_w = 5.0 - 7.8$ para intraplaca, restringidos a una distancia máxima a la fuente sísmica de 400 [km]. No se consideran eventos de mecanismos superficiales u otro tipo.

Zhao et al. [ZIZ⁺06] justifica utilizar espectros de respuesta por sobre espectros de amplitud de Fourier a partir de un argumento práctico. La utilización de espectros de amplitud de Fourier para razones H/V requiere aplicar un suavizado a los espectros, el cual debe ser el mismo en cada registro a modo de mantener una consistencia en las amplitudes. Sin embargo, seleccionar características de suavizado que entreguen resultados satisfactorios en todos los casos puede resultar engorroso si la cantidad de registros es alta. Por otro lado, el espectro de respuesta no amortiguado posee una forma similar al espectro de amplitud de Fourier, excepto en los periodos cortos [ZIZ⁺06]. De manera adicional, si se considera un amortiguamiento de 5% para los espectros de respuesta, se produce un efecto de suavizado que mantiene la consistencia de amplitudes para cada registro y que no requiere de un gran análisis en su aplicación [ZIZ⁺06].

Las curvas resultantes se agrupan por estación sísmica y se calcula su media aritmética. Ésta se asume como representativa de las características dinámicas del sitio, donde el periodo predominante del suelo se identifica de manera automática como el valor $T \geq 0.1$ [s] donde la media alcanza su mayor amplitud. Si la amplitud máxima es menor a 2, no se asigna un valor de T^* sino la palabra *plano*. Realizado este cálculo, se revisan visualmente las medias de las relaciones H/V de cada estación y el valor de T^* que se le ha asignado. Se corrigen aquellos que muestran valores máximos múltiples de amplitud comparables, donde resulta ambiguo asignar un sólo valor, eliminando la asignación y reemplazándola por la palabra *banda*, referente a amplificación en banda ancha. Mientras más grande sea el número de registros que construyen la relación H/V media de cada estación sísmica, más representativo puede llegar a ser su forma del factor de amplificación del sitio, pues registros específicos donde no se cumplen alguno de los supuestos de la técnica se pierden en el comportamiento promedio.

La Figura (5.2) muestra tres ejemplos de estaciones que representan las tres situaciones descritas. La media de la relación H/V de la estación PB03 posee una forma plana propia de roca rígida, por lo tanto no se ha asignado un periodo predominante. Para la estación AP01 se identifica una amplificación de banda ancha para el rango de periodos de 0.3 – 0.9 [s] por lo que tampoco se entrega un valor de T^* . En el último grupo, para las cuales si se puede identificar una amplificación clara en las cercanías de un periodo determinado se encuentra la estación CUY, donde se asigna un $T^* = 0.21$ [s]. Se puede ver además el límite de periodos largos para la cuál es válida su relación H/V, que debido a las características del equipo de grabación instalado en ella, no alcanza más allá de los 3.5 [s] aproximadamente, donde el ruido de baja frecuencia genera distorciones importantes (ver Capítulo 3). En la Tabla (A.2) se muestra la lista completa de los periodos asignados a cada una de las estaciones sísmicas utilizadas en este estudio.

5.2. Clasificaciones de suelos

A partir de las formas de las relaciones espectrales H/V obtenidas en cada estación sísmica, además otros datos geotécnicos como valores de V_{S30} y los valores determinados de T^* , se proponen diferentes clasificaciones que permitan agrupar sitios en función de comportamientos dinámicos comunes.

5.2.1. Primera clasificación: periodo predominante T^*

Las primeras versiones desarrolladas de clasificaciones definidas respecto al periodo de vibrar del suelo [ZIZ⁺04, ZZA⁺06], agrupan sitios de estaciones de las redes de instrumentos japonesas por el valor de T^* , considerándolo como un equivalente directo de las clasificaciones realizadas a través de V_{S30} a partir de la Ecuación (5.3). Posteriormente *Fukushima et al.* [FBSD07] separa las formas planas de la clase de periodos cortos en una nueva categoría denominada *roca genérica*, al mismo tiempo que crea una nueva clase para aquellos suelos que presentan amplificación pero que no poseen un periodo predominante identificable, que

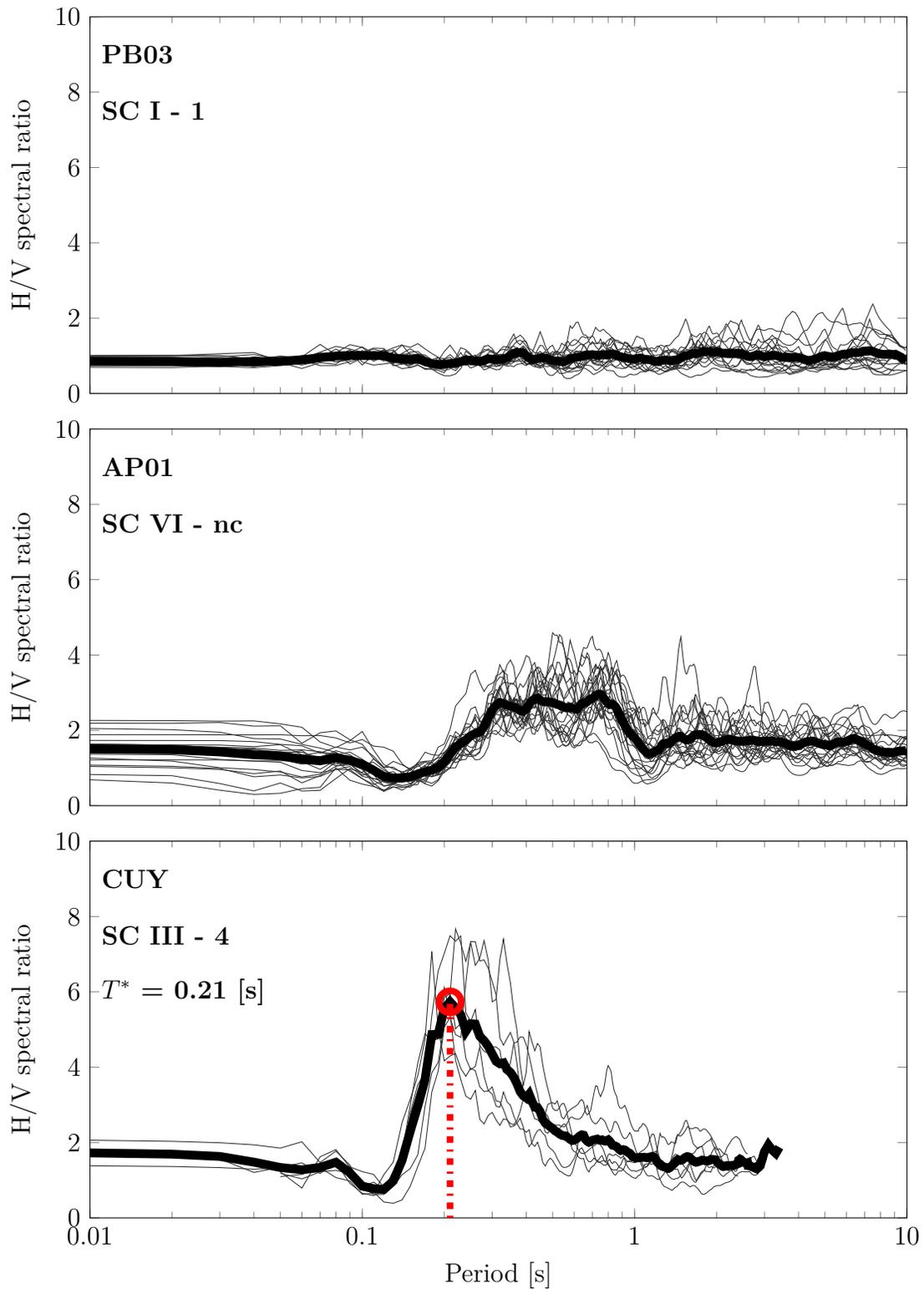


Figura 5.2: Razones espectrales H/V de diferentes estaciones sísmicas. La línea gruesa indica el valor de la media aritmética, con el periodo predominante del suelo marcado en un círculo.

denomina *suelo blando genérico*. Finalmente *Di Alessandro et al.* [ABB⁺12], continuando el desarrollo de estos estudios para el caso de la red de instrumentos italiana, separa los sitios que

específicamente presentan amplificación de banda ancha del resto de suelos blandos genéricos, además de separar una clase en dos, acortando el rango de periodos para pertenecer a ella.

En este estudio se utiliza la clasificación propuesta en la Tabla (5.1), que resulta similar a las de los últimos estudios desarrollados [FBSD07, ABB⁺12], considerando los suelos con amplificación de banda ancha y los genéricos no identificables en la misma clase. Se utilizan números romanos para definir el total de seis tipos de suelo. La primera clase I corresponde a sitios cuyas relaciones espectrales H/V muestran una forma plana, con amplitudes máximas menores a 2. Geológicamente están asociados a formaciones rocosas en superficie donde no es posible observar amplificación dinámica de suelos. Coincide además que los valores de V_{S30} son los más altos, superiores a 700 [m/s] por lo general. Para los sitios donde fue posible identificar un periodo predominante se asignan las clases de la II a la V, en función del valor obtenido. Caben dentro de ellas desde gravas duras hasta suelos finos de diferentes profundidades. En la clase VI se agregan aquellos suelos que no poseen un único valor máximo identificable como periodo predominante, además de aquellos sitios que presentan formas tipo “sombbrero”, que dan cuenta de amplificaciones en banda ancha y no en un punto específico. Las formaciones geológicas de esta clase pueden ser variadas. La Tabla (5.1) muestra un resumen de las cantidades de estaciones para cada clase, mientras que la Tabla (A.2) indica la clase asignada a cada estación sísmica.

Tabla 5.1: Descripción de la clasificación de sitios en función de T^* y la cantidad de estaciones sísmicas de cada categoría.

Clase	Definición	Cantidad
I	$H/V < 2$	35
II	$T^* < 0.2$ [s]	9
III	0.2 [s] $\leq T^* < 0.4$ [s]	30
IV	0.4 [s] $\leq T^* < 0.8$ [s]	23
V	0.8 [s] $\leq T^*$	10
VI	Amplificación banda ancha	28
Total		135

Asignado un tipo de suelo a cada estación, se calculan la media aritmética y desviación estándar para el total de razones H/V asociados a cada clase dentro del rango máximo de periodos 0.01 – 10 [s]. Los resultados para cada clase se muestran en la Figura (5.3) donde la clase I posee un notorio comportamiento plano, con la más baja de las desviaciones estándar relativa a las demás clases en todo el rango de periodos. En el caso de las medias de clases II-V, las líneas verticales punteadas indican los valores de T^* que definen sus límites, donde para los cuatro casos se cumple que sus valores máximos quedan contenidos dentro de ellos, lo que es consistente con la definición de las clases. En general es notoria la alta correlación existente entre la forma de la media con la de la desviación estándar. Es decir, en aquellos periodos donde estas clases alcanzan su mayor amplitud, también se alcanzan los mayores niveles de desviación estándar respecto a la media, lo que indica que la clasificación por T^* no logra agrupar por completo en una misma categoría los distintos niveles de amplificación. Es posible establecer que dicha dispersión del nivel de amplificación, es decreciente respecto a T^* si se consideran las clases II, III y IV, con la clase V como excepción.

La Figura (5.3) permite también reconocer la influencia que tienen los diferentes tipos de

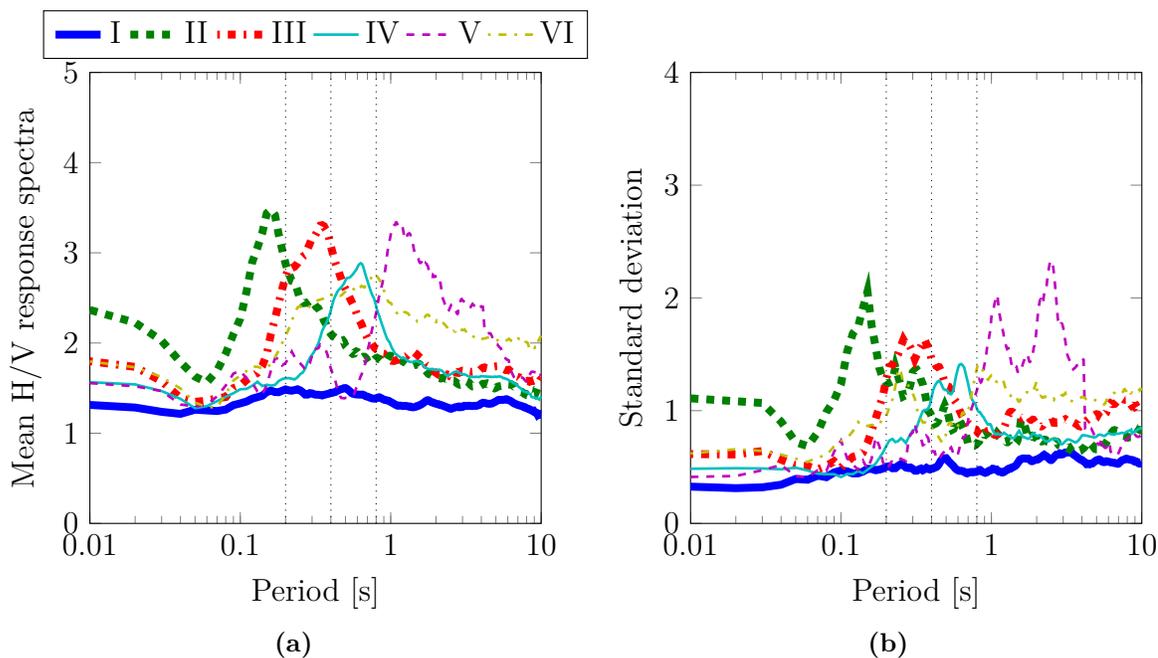


Figura 5.3: Indicadores estadísticos de la clasificación de suelos propuesta en función de T^* : (a) media aritmética y (b) desviación estándar del total de datos asociados a cada clase.

sitio a la hora de alterar los valores de PGA en roca a través de su capacidad de amplificación dinámica. Existe una tendencia que indica que para un sitio determinado, mientras menor es el valor de T^* , mayor es el nivel de amplificación en el PGA o en valores de periodos cortos o alta frecuencia. Es más, para las clases IV y V, de periodos $T^* \geq 0.4$ [s] su efecto sobre el PGA y periodos cortos es despreciable, lo que es coherente con el comportamiento teórico esperado y descrito en la sección 5.1. De hecho sería esperable ver disminuciones de PGA y aceleraciones en periodos cortos para sitios de T^* grande, sin embargo, como hemos mencionado con anterioridad, la función de transferencia no se comporta de manera idéntica a las razones espectrales H/V entendidas como factor de amplificación. Estudios empíricos realizados a partir de otras técnicas han logrado reproducir este efecto [BJ97].

Una limitación de este estudio no atribuible a la técnica se da respecto a los valores entregados para periodos largos. Es esperable que una vez alcanzado el valor máximo y punta en cada clase, el comportamiento de la media sea monótono decreciente asintóticamente hacia el valor 1. Sin embargo, a partir de los 2 [s] aproximadamente se observa el inicio de una tendencia al aumento en las clases III, VI y II, que se repite para las otras en periodos más largos. Este efecto es artificial y no representa el comportamiento promedio respecto a la amplificación del suelo. Su aparición responde a que para el cálculo de cada media y desviación estándar se utilizan espectros de aceleraciones con distintos límites de validez en su periodo largo. Por lo tanto, a partir de un punto que varía en cada clase, comienzan a descartarse datos para el cálculo de las medias, generando el sesgo artificial mencionado que tiende hacia el alza.

La Figura (5.4) pone a prueba la distribución de las categorías propias de la clasificación por valor de T^* con mediciones de intensidad de movimiento superficial de diferentes estaciones sísmicas ya clasificadas. En el eje vertical se muestran los valores de PGA para registros

de sismos agrupados en cuatro rangos diferentes de magnitud, versus las distancias de las estaciones al área de ruptura. Para cada cuadro, con excepción del primero de pequeñas magnitudes, es posible verificar la observación previa respecto a la influencia de cada clase en el valor del PGA. En su gran mayoría los puntos de la clase II se encuentran por sobre las posiciones que ocupan los de la clase I. De manera menos clara, existe una tendencia a que los puntos de la clase III se ubiquen por sobre los puntos de la clase I. Las distribuciones de las clases IV-VI resultan comparables a las de la clase I, no identificando tendencias de una sobre otra.

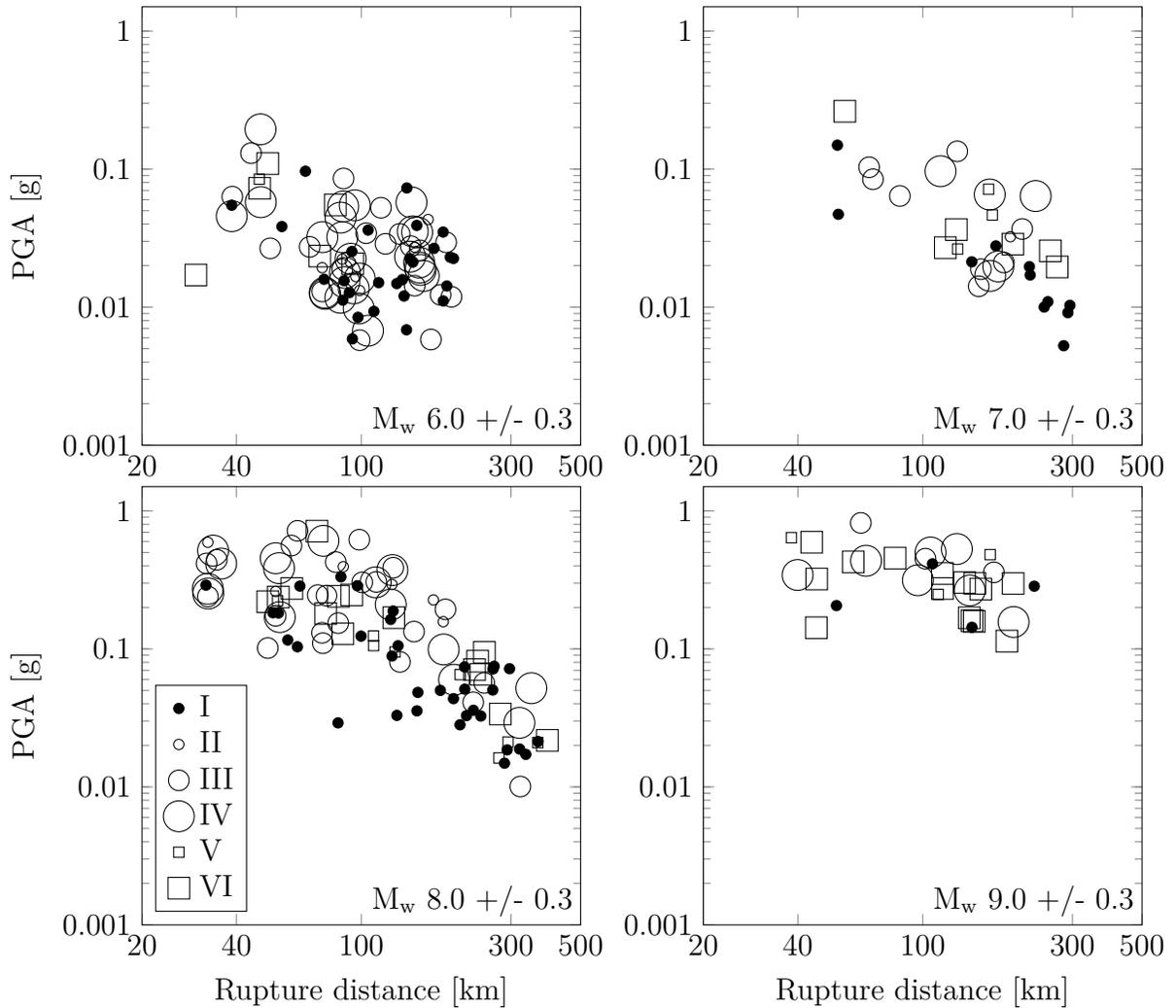


Figura 5.4: Distribución de la clasificación en base a T^* sobre datos de PGA para diferentes rangos de magnitud de sismos chilenos interplaca.

5.2.2. Segunda clasificación: forma y amplitud de las razones espectrales H/V

En consideración de los altos niveles de dispersión en la magnitud de la amplificación para clases de sitios asignadas según el valor de T^* identificado (ver Figura(5.3)), siguiendo criterios

de caracterización similares a *Pastén* [Pas07], se propone una segunda clasificación definida en la Tabla (5.2) en base a los valores máximos que alcanzan las razones espectrales H/V de cada estación, independiente de la clasificación anterior. Aquellas donde no fue posible determinar un periodo predominante a pesar de existir amplificación y que previamente fueron catalogadas como suelo blando genérico, ésta vez han sido marcadas como S/C o no clasificables. En términos de definición, la clase 1 es plenamente coincidente con la I y hacen referencia a la misma composición geológica y comportamiento dinámico. En la clase 2 se agrupan estaciones con formas espectrales que muestran una amplitud

levemente por sobre la línea base horizontal de la clase 1 en un periodo determinado. Para la clase 3, se identifica la misma forma espectral H/V pero más marcada, con amplitudes de la media cercanas a 4. Finalmente la clase 4 muestra las estaciones de mayores amplitudes en sus razones espectrales H/V, con valores de la media máxima cercanos o incluso superiores a 6. Ya que la asignación de una clase u otra se realiza por evaluación visual de la forma de la razón espectral H/V media en cada estación, esta clasificación posee una componente subjetiva mayor que la anterior. Una distribución de las cantidades de sitios asignados a cada clase y un resumen de sus descripciones respectivas se muestran en la Tabla (5.2), mientras que la Tabla (5.3) muestra el detalle comparado de las cantidades de ambas clasificaciones y su distribución cruzada. El detalle de las asignaciones para cada una de las estaciones sísmicas utilizadas en este estudio puede verse en la Tabla (A.2).

Tabla 5.2: Descripción de la clasificación respecto a la forma y amplitud de las razones espectrales H/V la cantidad de estaciones sísmicas de cada categoría.

Nro.	Nombre	Descripción	Cantidad
1:	Plano	Forma plana.	35
2:	Somero	Pequeño peak sobre comportamiento plano.	21
3:	Claro	Un peak de amplitud media.	29
4:	Muy Claro	Un peak pronunciado de gran amplitud.	22
nc:	S/C	Sin clasificar/No ajusta	28
Total			135

Tabla 5.3: Detalle de las cantidades de estaciones sísmicas en las dos clasificaciones propuestas.

Primera Clasificación	Segunda clasificación				
	Plano	Somero	Claro	Muy Claro	No clasifica
I	35	0	0	0	0
II	0	4	2	3	0
III	0	7	14	9	0
IV	0	9	8	6	0
V	0	1	5	4	0
VI	0	0	0	0	28
Total	35	21	29	22	28

En la Figura (5.5) se muestran las medias aritméticas y desviaciones estándar para cada clase en función de los datos propios de las estaciones correspondientes a ellas. Para la media,

es posible ver un comportamiento coherente con la definición respecto al nivel general de amplitudes, que va en aumento desde la clase 1 a la 4. Si se la compara con la clasificación anterior, en este caso no existe una variación de la localización de las amplitudes máximas de cada clase, concentrándose toda la amplificación como un comportamiento promedio en el rango 0.15-0.8 [s] aproximadamente. Es posible identificar el mismo efecto de aumento artificial de las amplitudes para periodos largos visto en el análisis de la clasificación anterior, manteniéndose la explicación de su origen y confirmando su presencia transversal en los datos H/V. Respecto a las desviaciones estándar, ya no se correlacionan con la forma de la media aritmética como en la Figura (5.3), mostrando una correlación inversa con el periodo. Adicionalmente sus valores máximos no presentan disminuciones significativas respecto a la anterior clasificación, manteniéndose eso sí en un rango más amplio de periodos. Por lo tanto, no se puede afirmar que esta clasificación por si sola represente el comportamiento dinámico de suelos.

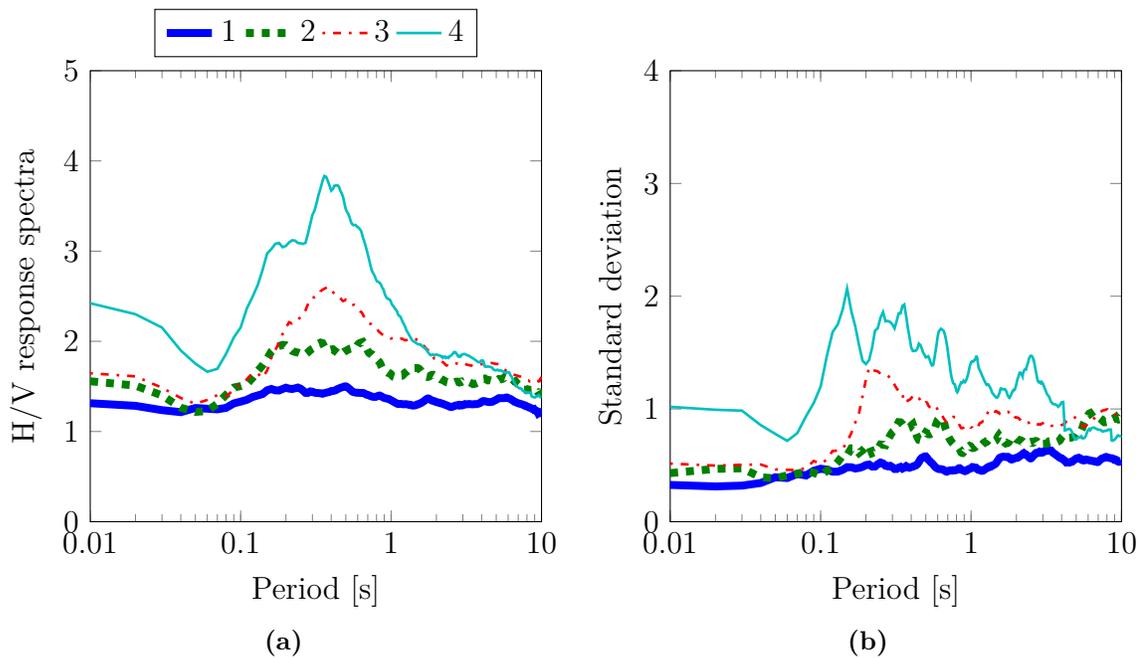


Figura 5.5: Parámetros estadísticos de la clasificación de suelos propuesta en función de la forma y amplitud máxima de las razones espectrales H/V: (a) media aritmética y (b) desviación estándar del total de datos asociados a cada clase.

A partir de la Figura (5.5) es posible notar que los mayores efectos de amplificación del PGA se dan en la clase 4, decreciendo hasta ser casi nulos en la clase 1. La Figura (5.6) confirma esta afirmación a partir de la distribución de las categorías de la nueva clasificación sobre la variación del PGA con la distancia al área de ruptura para datos agrupados según magnitud. De forma más clara para el grupo de $M_w = 8.0 \pm 0.3$, los sitios de clase 1 muestran una tendencia a estar por debajo del resto, mientras que los de clase 4 se ubican por arriba y los de clase 2-3 entre ambos. Este comportamiento resulta contrario al observado para la clasificación anterior, donde el efecto sobre el PGA se veía disminuido al avanzar desde rocas o suelos duros de clase II a suelos blandos de clase V.

Sintetizando el análisis comparativo sobre los resultados de ambas clasificaciones, se puede concluir que sus descripciones del fenómeno de amplificación son complementarias. Utilizadas

cada una por si sola, generan niveles de dispersión cuantitativamente similares pero cualitativamente diferentes. Mientras que la clasificación respecto al valor de T^* ubica de manera correcta el rango del espectro donde se da el fenómeno, falla en separar los diferentes niveles de su amplitud, generando formas de la desviación estandar con valores máximos concentrados en el mismo periodo que la amplificación máxima y bajos en otros rangos. Análogamente, la clasificación respecto a la forma y amplitud de las razones espectrales H/V agrupa correctamente los diferentes niveles de amplitud, pero junta dentro de la misma clase las ubicaciones, generando una desviación estándar en general levemente más baja pero distribuida en un rango de periodos más amplio.

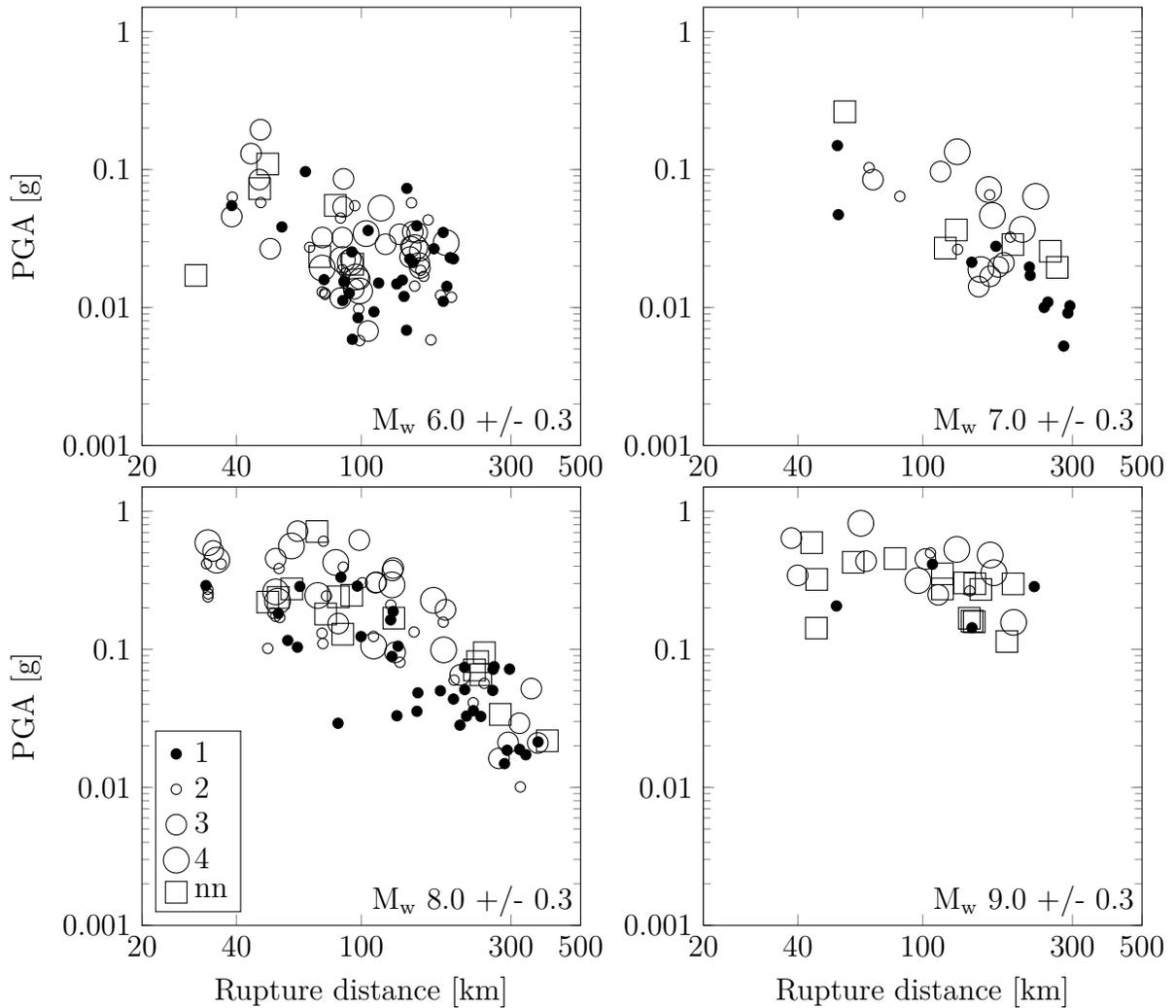


Figura 5.6: Distribución de la clasificación en base a la forma y amplitud máxima de relaciones espectrales H/V sobre datos de PGA para diferentes rangos de magnitud de sismos chilenos interplaca.

5.3. Factores de amplificación dinámica

Ya asignadas las diferentes clasificaciones propuestas a cada estación sísmica, se desarrolla un modelo de cuantificación del nivel de amplificación dinámica a partir de la utilización combinada de las dos principales. En la misma dirección que *Choi et al.* [CS05], se determina un factor de amplificación $S(T)$, que relaciona el movimiento superficial observado con el movimiento esperado de un sitio de referencia con características dinámicas de amplificación conocidas, de forma similar a la Ecuación (5.1). Como sitio de referencia se utiliza la roca rígida, representada por las clases I y 1 de razones espectrales H/V planas. Si bien es sabido que estos sitios, comúnmente asociados a afloramientos rocosos, presentan algún nivel de amplificación [BJ97], en general es menor al de cualquier otra de las clases definidas para todo periodo. Al volver a las Figuras (5.3) y (5.5), para ambas clase, I y 1, los valores medios de sus razones espectrales H/V son ligeramente superiores a 1, lo que se podría explicar en parte por la presencia de ondas *Love* con amplitudes considerables en los registros, el no cumplimiento general de los supuestos de la técnica o, que a pesar de que ambas clases corresponden a sitios roca, existan valores de la razón de impedancia que generen una ligera amplificación.

Para todas las clases se calculan los valores normalizados de sus medias de las razones espectrales H/V de la forma

$$\mu_o = \frac{\mu}{\mu_{ref}} \quad (5.9)$$

donde μ representa la razón H/V de la clase respectiva y μ_{ref} la razón espectral H/V de la clase que representa el comportamiento de sitios roca (I ó 1 dependiendo de la clasificación). La Figura (5.7) muestra los resultados para las dos clasificaciones principales, que se pueden interpretar como un factor de amplificación dinámica promedio en relación al movimiento sobre un afloramiento rocoso.

Para proponer un modelo que describa la amplificación en función de un uso combinado y complementario de las dos clasificaciones desarrolladas en detalle, se vuelve brevemente a la exposición teórica de la sección 5.1. El periodo predominante T^* puede ser utilizado como un estimador de T_o a la hora de ubicar el periodo o rango de periodos donde se concentra la amplificación. Los factores de amplificación μ_o poseen una discretización suficiente para ser una buena aproximación de dicho efecto cualquiera sea el valor de T^* . Por otro lado, la clasificación en función de la forma y amplitud de las razones espectrales H/V agrupa los sitios según los mismos efectos que producen diferentes valores de la razón de impedancia Δ . De hecho se puede suponer que existe una correlación de la razón de impedancia con la definición de esta clasificación, donde la clase 4 posee el valor más bajo y la clase 1 el más alto. Como no existe un método para determinar su valor de manera específica, se propone la definición de un parámetro n como estimador que reproduzca de manera general su comportamiento y que actúe sobre el factor de amplificación a través de la clasificación anterior de la forma

$$f(\Delta, T_o) \approx \mu_o^n \quad (5.10)$$

donde f corresponde a una aproximación del factor de amplificación y los valores de n se definen en función de la clasificación respecto a la forma y amplitud de las razones espectrales H/V. La clase 1 se considera como referencia para cuantificar la amplificación dinámica,

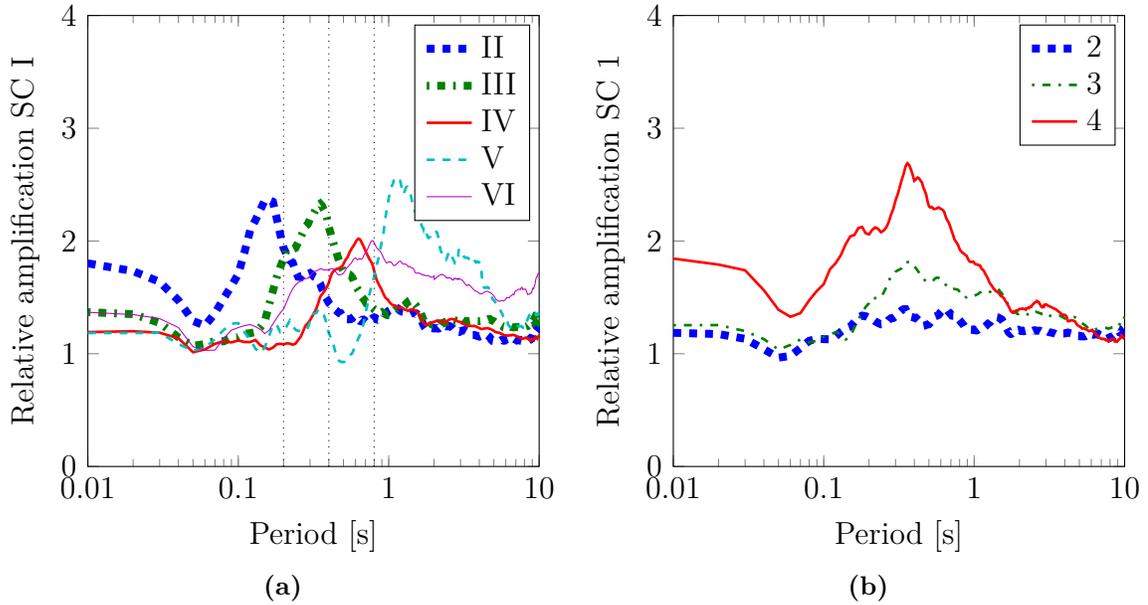


Figura 5.7: Factores promedio de amplificación dinámica para cada clasificación respecto a la (a) clase I y a la (b) clase 1.

es decir, en su caso el factor de amplificación es unitario por lo que $n_1 = 0$. Agrupando la clase 3 los valores de amplitudes intermedias entre la clase 2 y 4, se cumple que μ_o representa aproximadamente su amplitud, por lo tanto $n_3 = 1$. Finalmente, considerando que μ_o representa el nivel de amplificación de la clase 3, se cumplirá necesariamente que $n_2 < 1$ y que $n_4 > 1$.

El cálculo de los valores n_2 y n_4 se realiza a través de un mismo procedimiento aplicado a los conjuntos de datos de razones espectrales H/V de cada una de las clases II, III, IV y V. Considerando únicamente las razones espectrales H/V normalizadas de las estaciones sísmicas asociadas a sólo una de las clases II, III, IV y V:

- a) Se dividen estas estaciones en subconjuntos según la clasificación relativa a la forma y amplitud de las razones espectrales H/V. Las cantidades de estaciones sísmicas asociadas a cada subconjunto se indican en la Tabla (5.3).
- b) Para cada subconjunto de estaciones de las clase 2 y 4, se calculan las medias aritméticas de las razones espectrales H/V respectivas.
- c) Se determina el valor n_2 de tal forma que $[\mu_o^{n_2}]_{max}$ sea igual al valor máximo de la media de la clase 2 calculada en (b). $[\mu_o]_{max}$ representa el máximo de la razón espectral H/V media normalizada asociada a la clase II, III, IV y V elegida inicialmente.
- d) Se determina el valor n_4 de tal forma que $[\mu_o^{n_4}]_{max}$ sea igual al valor máximo de la media de la clase 4 calculada en (b).
- e) Se repite el procedimiento para cada una de las clases II, III, IV y V.

Tabla 5.4: Detalle del cálculo de los valores de n_2 y n_4 para cada iteración. Se incluyen los valores finales medios ponderados.

	n_2	n_4
II	0.5794	1.6541
III	0.5598	1.5335
IV	0.7841	2.0889
V	0.7896	1.5586
Media	0.6658	1.7295

Tabla 5.5: Discretización de valores del coeficiente de corrección n en función de la segunda clasificación.

Clasificación	Forma H/V	n
1	Plano	0
2	Somero	0.666
3	Claro	1.000
4	Muy Claro	1.730

- f) Se calcula un valor medio de n_2 y n_4 ponderado por el número de estaciones sísmicas disponibles considerando los valores obtenidos para cada una de las cuatro clases (II, III, IV y V).

La Tabla (5.4) muestra los resultados de cada paso y el valor final ponderado. La Figura (5.8) muestra cada una de las medias de razones espectrales H/V calculadas, además de incluir los valores respectivos de $\mu_o^{n_2}$ y $\mu_o^{n_4}$.

Según las ecuaciones (5.6) y (5.4), mientras no existan variaciones de las propiedades dinámicas del suelo, no existe amplificación por refracción y $\Delta = 1$. Cuando Δ disminuye con tendencia hacia cero, aumentan los niveles de amplitud de la amplificación. En el caso en que $\Delta > 1$, existe una reducción del movimiento de referencia. Por lo tanto, si el factor de amplificación se aproxima por (5.10), considerando los valores finales de la Tabla (5.5) n posee una relación proporcional con $1/\Delta$.

En conclusión, se propone un modelo para cuantificar la amplificación dinámica de manera detallada a partir de las dos causas teóricas que la definen: la impedancia Δ y el periodo fundamental del suelo T_o . La forma que asumen los factores de amplificación respecto al movimiento sobre un afloramiento rocoso es

$$Y = Y_o \mu_o^n \tag{5.11}$$

donde μ_o corresponde a la forma promedio del factor de amplificación en función del periodo predominante T^* y n a un parámetro que reproduce el efecto de la impedancia.

Para finalizar se aplica una función de suavizado a los coeficientes de la Figura (5.7a) y se fija su valor en los periodos largos donde se observa una tendencia artificial al alza. De esta forma se asegura un comportamiento monótono decreciente después de alcanzar el nivel de amplitud máxima se corrige el sesgo previamente identificado. La Figura (5.9) muestra los

Tabla 5.6: Factores promedio de amplificación dinámica μ_o relativos al movimiento sobre un afloramiento rocoso para las clases definidas respecto al periodo predominante T^* .

Periodo	μ_o^{II}	μ_o^{III}	μ_o^{IV}	μ_o^V	μ_o^{VI}
PGA	1.8748	1.4148	1.1242	1.1075	1.2563
0.01	1.7559	1.3263	1.1132	1.1036	1.2313
0.02	1.6383	1.2506	1.1037	1.1011	1.2102
0.03	1.5223	1.1877	1.0956	1.0999	1.1931
0.05	1.3894	1.0998	1.0837	1.1016	1.1706
0.07	1.4590	1.0616	1.0776	1.1087	1.1639
0.10	1.7566	1.0977	1.0787	1.1290	1.1826
0.15	2.1046	1.4355	1.1071	1.1954	1.3010
0.20	2.0581	1.8008	1.1465	1.2526	1.4715
0.25	1.8745	2.0644	1.2113	1.2872	1.6131
0.30	1.7244	2.1927	1.3204	1.2868	1.6960
0.40	1.5144	2.1667	1.5762	1.1931	1.7791
0.50	1.3808	1.9808	1.7816	1.1252	1.8220
0.75	1.3454	1.5299	1.8569	1.4700	1.9052
1.00	1.3448	1.3146	1.6447	2.0561	1.8748
1.50	1.3074	1.2926	1.3813	2.3684	1.7547
2.00	1.2641	1.2827	1.2670	2.2321	1.6752
3.00	1.2132	1.2662	1.2532	1.9665	1.6425
4.00	1.2017	1.2647	1.2560	1.7705	1.6199
5.00	1.1988	1.2647	1.2443	1.6015	1.6040
7.50	1.1987	1.2647	1.1794	1.3170	1.5978
10.00	1.1987	1.2647	1.1435	1.2824	1.5978

resultados de los coeficientes corregidos y sus valores pueden verse en la Tabla (5.6) para el rango de periodos 0.01-10 [s].

Una validación final de los resultados puede verse en la Figura (5.10), que muestra las relaciones espectrales H/V para tres estaciones sísmicas diferentes, junto a la media y la evaluación del modelo de amplificación dinámica desarrollado en este estudio. Si bien el ajuste no es exacto, el resultado es representativo considerando la gran dispersión de los datos en general. Desarrollos futuros de modelos de amplificación dinámica utilizando la técnica de razones espectrales H/V a partir de datos de terremotos, podrían avanzar hacia obtener modelaciones de los efectos tanto del T_o como de Δ de manera continua, prescindiendo de las clasificaciones discretas. Adicionalmente se podrían comparar los resultados de este estudio con los obtenidos a partir de la utilización de la técnica de *Nakamura* sobre registros de microvibraciones en los mismos sitios de las estaciones sísmicas estudiadas. En el anexo A se puede revisar el modelo aplicado a cada una de ellas.

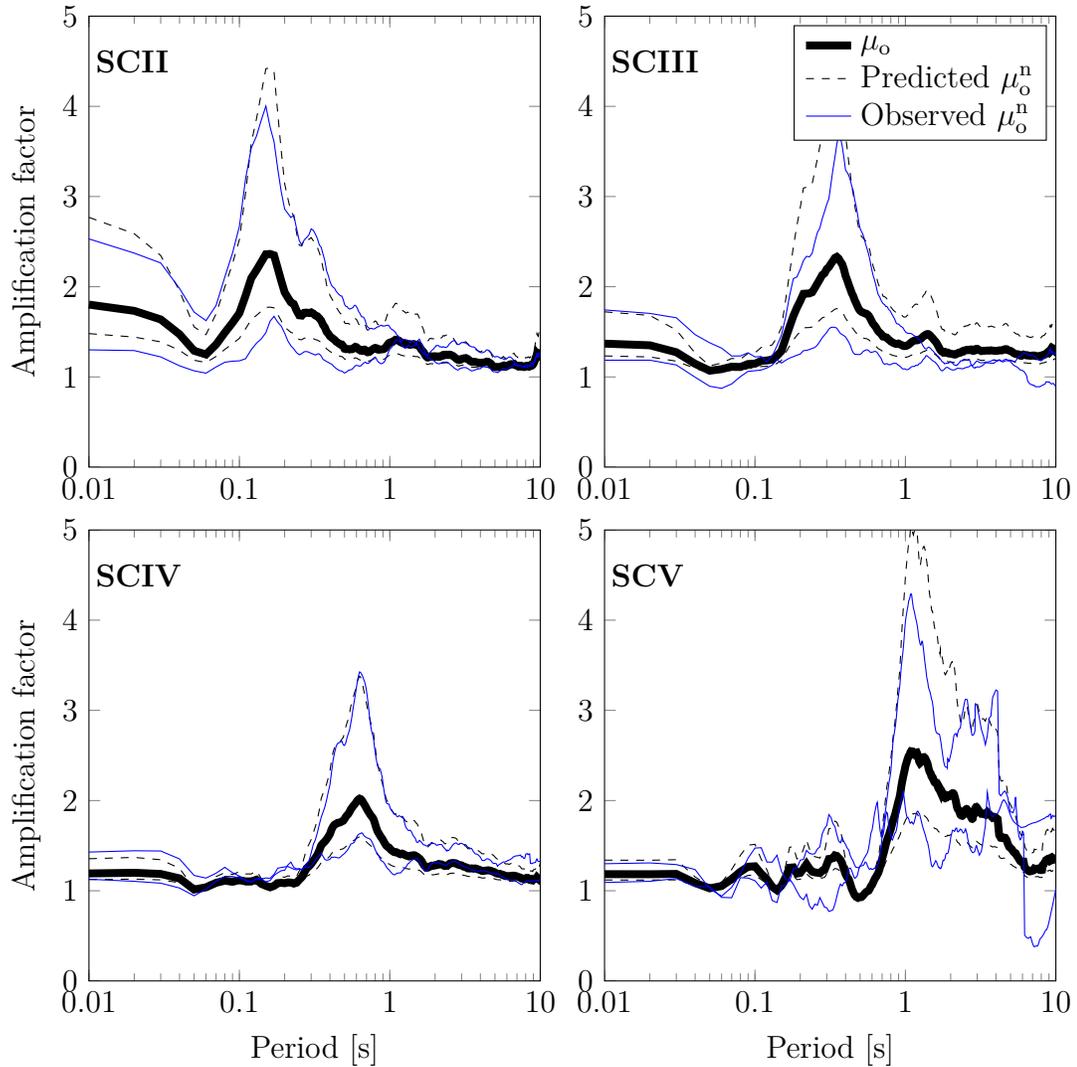


Figura 5.8: Determinación de los coeficientes n_2 y n_4 para las clases II, III, IV y V. La línea gruesa representa la media de las razones H/V (μ_o) de las estaciones asociadas a la clase respectiva II, III, IV y V. Las líneas sólidas delgadas representan las medias de las razones H/V de las estaciones con clase 4 (línea sólida delgada superior) y clase 2 (línea sólida delgada inferior) respectivas a cada clase II, III, IV y V. Las líneas punteadas representan el valor de μ_o elevado a la potencia de n_2 y n_4 , utilizando los valores de la Tabla (5.4).

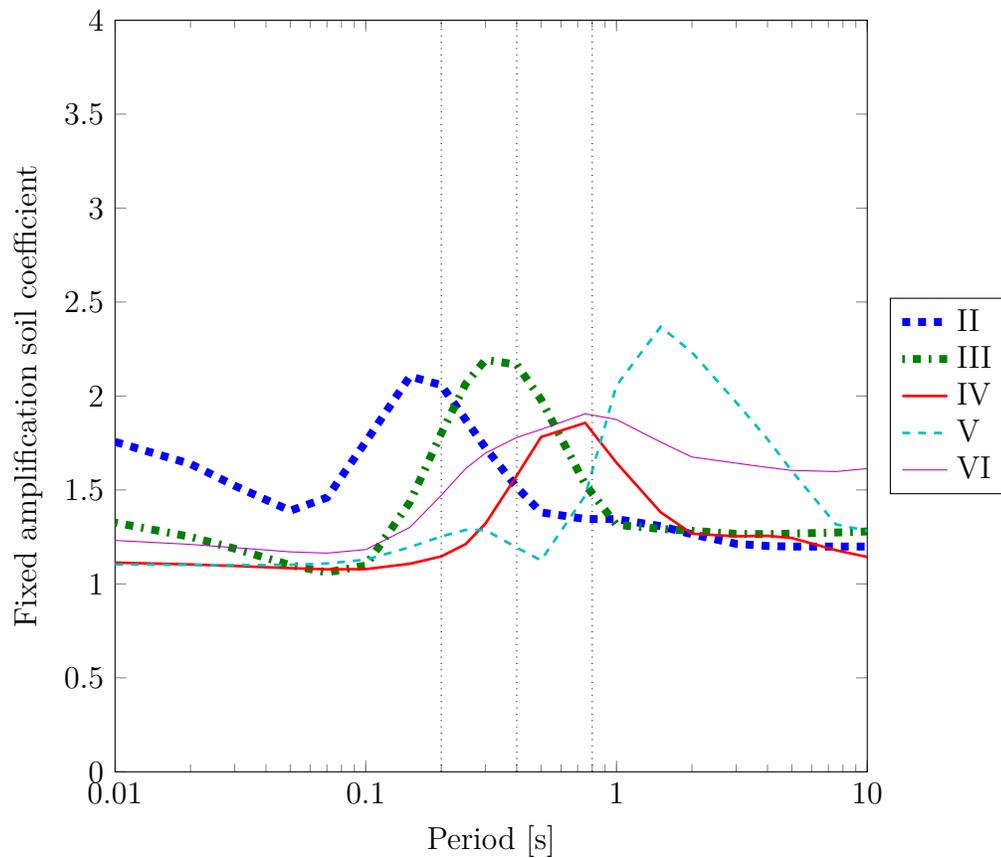


Figura 5.9: Factores promedio de amplificación dinámica μ_o relativos al movimiento sobre un afloramiento rocoso para las clases definidas respecto al periodo predominante T^* . Se ha aplicado un suavizado y una corrección del sesgo en periodos largos.

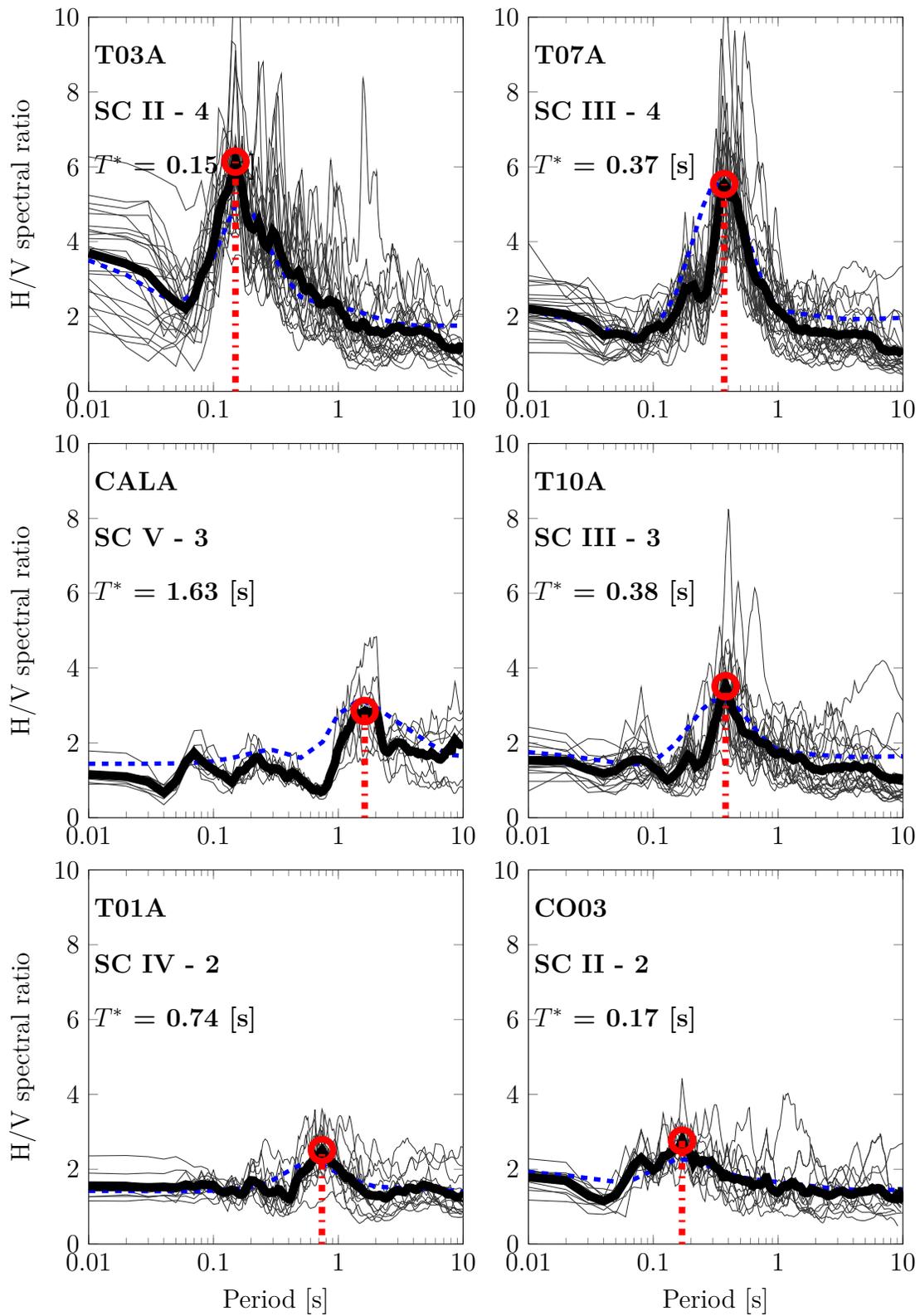


Figura 5.10: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

Si bien los ajustes de la Figura (5.10) son evaluados de manera positiva, pueden existir dificultades para asignar un valor de n para un sitio que no posee una estación sísmica que permita reproducir la técnica aquí descrita. La primera aproximación posible corresponde a realizar mediciones de microvibraciones en la superficie del sitio y aplicar la técnica de *Nakamura* para asignar una clasificación en función de la forma y amplitud de las razones espectrales H/V. Una segunda opción consiste en asignar un valor arbitrario de n en función de la descripción geológica de la superficie, sugerencias que quedan pendientes para nuevas investigaciones. Información geológica de diferentes estaciones sísmicas se puede encontrar en las recopilaciones de información geotécnica de *Arango et al.* [ASB⁺11] y *Boroschek et al.* [BCKS12].

5.3.1. V_{S30} como indicador del nivel de amplificación

Adicionalmente a las formas de estimación del valor de n ya señaladas, se puede utilizar el valor de V_{S30} como indicador del nivel de amplificación dinámica. En la Figura (5.11) se muestra el factor de amplificación lineal utilizado por las curvas de atenuación de *Boore y Atkinson* [BA08], definido de manera continua en función de V_{S30} . Si se compara su forma y la manera en que varían las amplitudes de cada una de las tres curvas, se puede establecer una similitud general al comportamiento de las curvas del cuadro derecho de la Figura (5.7). Esto porque las relaciones reportadas por otros autores respecto a la impedancia y V_{S30} [DBC⁺00] son similares a las establecidas en este estudio con relación a n . Si n es proporcional a $1/\Delta$ y V_{S30} corresponde a un indicador del valor de Δ [DBC⁺00], n es proporcional a $1/V_{S30}$. De tal forma que si existen valores de n que representan el nivel de amplificación de una clasificación de forma independiente al valor de T^* , también existe un valor promedio de V_{S30} que hace lo mismo, existiendo una correlación entre ambos indicadores.

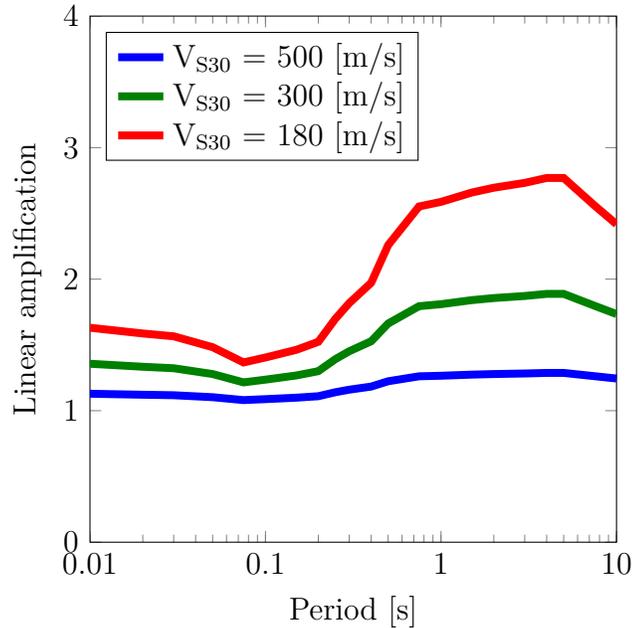


Figura 5.11: Factores de amplificación lineal para *Boore y Atkinson* [BA08] evaluados para diferentes valores de V_{S30} .

Sin embargo, al igual que la clasificación de este estudio, no es posible modelar por completo el fenómeno de amplificación dinámica únicamente a partir de V_{S30} . La solución adoptada por los estudios que así lo hacen [CS05, BA08], consiste en desestimar el hecho que la amplificación no sólo tiene una amplitud sino también una localización dentro del espectro, utilizando formas conservadoras que incluyen todo el rango de periodos donde podría desarrollarse. Para proponer una relación entre n y V_{S30} , se considera el modelo utilizado por estos estudios, expresado por

$$F_S = b_{lin} \log \left(\frac{V_{S30}}{V_{ref}} \right) \quad (5.12)$$

donde F_S corresponde al logaritmo del factor de amplificación, b_{lin} a un coeficiente de forma que muestra el comportamiento lineal del suelo en función al periodo y V_{ref} un valor de referencia de V_{S30} para el cual no existe amplificación. Considerando que el factor de amplificación de este estudio se define por (5.10), el logaritmo del factor de amplificación sería $n \log(\mu_o)$. Si se compara este resultado con 5.12, $\log(\mu_o)$ cumple una utilidad similar a b_{lin} y n es una función de V_{S30} . Se asume que aquella relación entre n y V_{S30} , que corresponde al modelo de correlación entre ambas variables, tiene la forma

$$n = b \log(V_{S30}) + \hat{a} = b \log \left(\frac{V_{S30}}{a} \right) \quad (5.13)$$

donde b y a son constantes a determinar. A partir de las 52 estaciones sísmicas que cuentan con mediciones o deducciones del valor de V_{S30} en los sitios que ocupan y que poseen una clase 1, 2, 3 ó 4, se obtienen los valores de n asociados a cada una de ellas según la Tabla (5.5). Con estos pares de datos ordenados por el valor de V_{S30} de menor a mayor, cada 10 pares se determinan las medias aritméticas de V_{S30} y n ponderadas según el número de registros asociados a la estación de cada par. Este tipo de ponderación permite asignarle mayor relevancia a los valores de n asociados a representaciones de la amplificación más confiables. La Figura (5.12) muestra los resultados de este procedimiento, con un comportamiento coherente a lo analíticamente proyectado. El primer rectángulo rojo de la izquierda indica el nivel de amplificación de los sitios que poseen los valores de V_{S30} más bajos, dando cuenta de un claro efecto de reducción producto de su comportamiento no lineal. Sin considerar aquel dato, se realiza un ajuste de mínimos cuadrados del modelo (5.13) a los rectángulos rojos, donde los valores resultantes para las constantes son $b = -2.1396$ y $a = 1530$, con un $R = 0.9639$. Al igual que *Abrahamson et al.* [AGA15], se considera que no es posible que el nivel de amplitud de la amplificación siga descendiendo después de valores de $V_{S30} > 1000$ [m/s], por tanto se establece este límite superior como valor máximo a la hora de realizar todos los cálculos.

Los datos de V_{S30} se obtienen de diferentes trabajos de construcción de base de datos y recopilación de información. Para 31 estaciones de la red RENADIC y GUC, asociadas al terremoto de Maule 2010, *Boroschek et al.* ([BCKS12]) recopila a través de diferentes fuentes descripciones geológicas de la superficie y valores de V_{S30} . Éstos últimos, dependiendo del estudio, corresponden a mediciones obtenidas a través de exploraciones en profundidad o determinaciones por técnicas superficiales como MASW. En los casos que existen ambos datos, se privilegia la medición a partir de exploraciones en profundidad. Algo similar realiza *Arango et al.* [ASB⁺11], que dentro de la base de datos que propone para sismos de Perú y Chile, incorpora una recopilación de valores de V_{S30} para estaciones chilenas adicional de las mismas condiciones antes expuestas. Como trabajo adicional y posterior a los últimos dos, la fundación *Fuchige* [Fuc] realiza diversos estudios geotécnicos agrupadas según su ubicación en

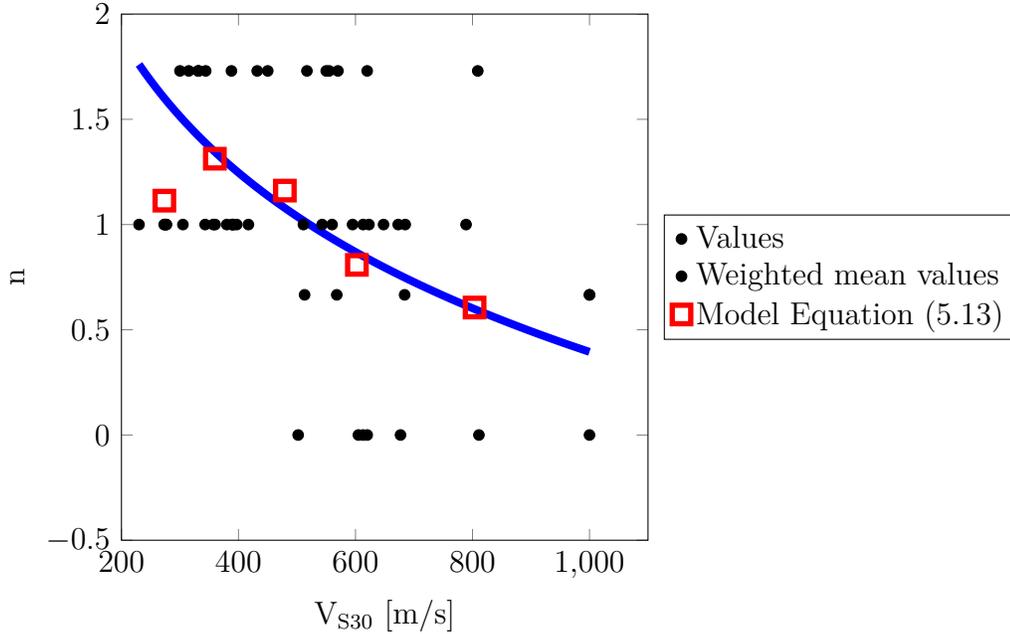


Figura 5.12: Relación entre el parámetro n y V_{S30} . Los puntos negros representan las estaciones con valores de V_{S30} disponibles. Los rectángulos rojos son promedios ponderados cada 10 estaciones ordenadas de menor a mayor según su valor de V_{S30} . La curva azul representa el ajuste por mínimos cuadrados del modelo de la Ecuación (5.13).

tres principales campañas: norte, centro y sur. A partir de estudios MASW activos y pasivos determinan perfiles de velocidad de onda de corte que permiten calcular el valor de V_{S30} con la definición de la Ecuación (5.14) [Ins]. En los casos que el perfil estuviera determinado para profundidades menores a los 30 metros, se ha asumido una extensión conservadora de la última capa hasta aquella profundidad.

$$V_{S30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{S_i}}} \quad (5.14)$$

Para evaluar el desempeño del modelo (5.13) al describir el nivel de amplificación, se corrigen los valores máximos de las razones espectrales H/V a un nivel de referencia $[\mu_o]_{max}$ propio de la clase 3. La Figura (5.13) muestra estos valores corregidos utilizando los valores de n de la Tabla (5.5), mientras que la Figura (5.14) hace lo mismo con los valores de n deducidos por el modelo (5.13) cuando un valor de V_{S30} estuvo disponible. Como era de esperarse al ser una corrección que actúa de forma arbitraria sobre la observación, el primer caso tiene bastante éxito normalizando todos los datos hacia la clase 3 y reproduciendo una tendencia plana de la amplitud para todo T^* . Para el segundo el resultado también es favorable pero no tan bueno con el primero, manteniéndose una tendencia proporcional a V_{S30} en alza y de pendiente variable. Sin embargo, en general las amplitudes se normalizan hacia un valor entre 2 y 4 aproximadamente, que corresponden a amplitudes cercanas a las de la clase 3. Es de esperar que en la corrección de la Figura (5.14) se produzca una dispersión mayor al ser V_{S30} un indicador de la amplificación y de las propiedades dinámicas del suelo que la producen y

no una medición de ella como lo es n . En la Figura (5.13) es posible identificar una tendencia a la disminución general de los valores máximos de la amplificación con el aumento de T^* .

Conclusiones similares a las obtenidas respecto a las dos definiciones de clasificaciones de sitios y sus relaciones con la amplificación se derivan para T^* y V_{S30} . La evaluación de los efectos de la amplificación depende de un comportamiento dinámico que se relaciona con las propiedades del suelo, en específico su periodo de vibrar y razón de impedancia. Existen estudios [ZIZ⁺04, ZZA⁺06, FBSD07, ABB⁺12, Ins] que describen el fenómeno únicamente a través del valor del periodo predominante como indicador del periodo fundamental de vibrar, planteando además una equivalencia directa con el valor de V_{S30} a través de la relación (5.3). Adicionalmente existen otros [AB03a, CS05, BA08, AGA15] que utilizan únicamente V_{S30} basados en el planteamiento que permite representar sin ambigüedad el nivel de amplificación [DBC⁺00]. La realidad es que producto que en la mayoría de los sitios el suelo posee múltiples estratos de propiedades dinámicas variables con la profundidad, la equivalencia entre ambas variables no existe y cada una termina describiendo de una forma cualitativamente diferente la amplificación. Los datos que ejemplifican la ambigüedad de estudios que utilizan sólo un indicador pueden verse en la Figura (5.13). Es posible identificar situaciones donde para un mismo T^* , los niveles de amplificación difieren bastante, además de aquellas donde para mismos valores de V_{S30} la amplificación se concentra en diferentes rangos de periodos. Las consecuencias son que los modelos en base a T^* reproducen el valor medio de la amplificación, mientras que los basados en V_{S30} sobrestiman la amplificación en un rango de periodos donde ésta es menor o inexistente. En conclusión, este estudio propone una utilización complementaria de ambos parámetros para la definición del factor de amplificación dinámica, donde T^* aporta con una ubicación detallada dentro del rango de periodos y V_{S30} indica el nivel de amplitud que ésta posee. Este modelo describe manera más detallada los efectos de la amplificación lineal que cualquier otro estudio similar basado únicamente en uno de los dos parámetros.

La consideración de los efectos no lineales de amplificación de suelos se mantiene como un tema inconcluso para desarrollar en futuras investigaciones. Siguiendo la filosofía de otros estudios de amplificación no lineal [CS05], este efecto actúa como una corrección al modelo de representación de la amplificación dinámica propuesto, que se activa cuando el valor del PGA calculado en roca supere cierto valor umbral de comportamiento lineal [DBC⁺00, BA08, AGA15]. La corrección deberá como mínimo flexibilizar el periodo dominante, desplazando la punta del factor de amplificación hacia la derecha, y disminuir en general la amplitud del espectro de aceleraciones resultante. Dichos efectos son manifestaciones de una disminución de la rigidez al corte del suelo G y un aumento del amortiguamiento ξ respectivamente, según lo visto en la sección 5.1. Adicionalmente, una versión continua que entregue factores de amplificación dinámica a partir de T^* permitiría cuantificar de manera más precisa el nivel de flexibilización requerida.

5.4. Comentarios respecto a la norma chilena oficial NCh 433.Of1996 modificada en 2012

Al comparar la Figura (2.4) con la Figura (5.9), que muestra los resultados de este estudio, es posible identificar que el modelo que representa la amplificación dinámica de suelos en la norma chilena oficial NCh 433.Of1996 modificada en 2012, α , no da cuenta que los sitios de periodo corto (A o B) tienen un mayor efecto de amplificación en el PGA y aceleraciones de alta frecuencia respecto a los de periodo largo (E). El factor de forma espectral α se limita a desplazar el valor máximo de la aceleración y a aumentar levemente su valor a medida que T_o es más largo. Si se corrigiera el efecto de amplificación para periodos cortos en función del tipo de suelo, ésta podría seguir siendo una forma correcta de localizar la amplificación. Sin embargo, se generan nuevas dificultades cuando la norma asigna la clasificación a partir del valor de V_{S30} como equivalencia de T_o a través de la Ecuación (5.3) y no con su valor directamente. Como se ha concluido anteriormente V_{S30} indica un nivel de amplificación y no necesariamente su localización en periodo, lo que significa una serie de suelos que no son bien modeladas por α . Al incorporar el factor S como función de V_{S30} , cuyo efecto se muestra en la Figura (2.3), se logra corregir en parte la situación. Ahora los espectros muestran claramente mayores niveles de aceleración para sitios de menores valores de V_{S30} , que implican mayores niveles de amplificación, comportamiento reproducido también en normas europeas y estadounidenses [DBC⁺00, CS05]. Sin embargo, el modelo inicial basado en la normativa japonesa y que intentaba localizar la amplificación dentro del espectro de periodos pierde total sentido práctico, introduciendo incluso tendencias falsas o contradictorias, como el aumento del nivel de amplificación con el aumento del periodo fundamental o que sitios de periodos más largos tengan mayores efectos de amplificación sobre el PGA que sitios de periodos cortos.

Una diferencia adicional entre las Figuras (2.4) y (5.9) corresponde a los valores asintóticos de los periodos largos del espectro, donde α posee una tendencia hacia 0 mientras que los coeficientes de amplificación de este estudio tienden a valores cercanos a 1. Aquella diferencia establece los límites de la comparación realizada, en el entendido que α no corresponde a un factor de amplificación dinámica de suelos, sino a un espectro definido de manera relativa al valor del PGA = $S_a(T_n = 0) = SA_o$. Los factores de amplificación de este estudio terminan por constituir un espectro cuando se multiplican por el espectro elástico de un suelo obtenido en roca. Entender el aporte de aceleraciones del sismo independiente de los efectos de amplificación dinámica, permite dar cuenta de la situación extrema de un suelo de periodo largo con altos niveles de amplificación, donde la consideración conjunta de las contribuciones energéticas del sismo y el efecto de amplificación tipo pulso generan un espectro final de aceleraciones con dos puntas. Adicionalmente permite reproducir de manera más fiel el fenómeno de la amplificación dinámica, superando incluso los métodos planteados por aquellos estudios basados únicamente en V_{S30} [DBC⁺00, CS05].

En conclusión, se propone avanzar en nuevas investigaciones cuyo objetivo sea proponer una modificación a la norma actual de diseño sísmico de edificios motivada en primera instancia por solucionar sus principales contradicciones teóricas y en una segunda etapa mejorar su capacidad de reproducir los efectos de amplificación dinámica. Esto significa buscar incorporar los efectos del comportamiento no lineal de suelos y definir una nueva descripción de los

efectos de la amplificación dinámica, ya sea utilizando de forma complementaria T^* y V_{S30} o en el peor de los casos una descripción conservadora sólo a partir de V_{S30} pero teóricamente consistente.

5.5. Conclusiones

Utilizando registros de terremotos tipo interplaca e intraplaca de magnitudes $M_w = 5.0 - 8.8$ y distancias máximas a la fuente sísmica de 400 [km], se determinaron factores de amplificación dinámica para diferentes tipos de suelos que actúan de la forma $Y = Y_o \mu_o^n$, donde Y_o corresponde al espectro lineal elástico en un afloramiento rocoso y μ_o^n al factor de amplificación espectral. El coeficiente μ_o de la Tabla (5.6) representa la forma espectral de la amplificación en función del periodo predominante T^* y permite localizar el rango de periodos específico donde según las propiedades dinámicas del suelo se concentra la amplificación. Por otro lado, el coeficiente n representa el nivel de amplificación y se puede determinar de dos formas. La primera utilizando la Tabla (5.5) de valores calculados para n en función de la clasificación según la forma y amplitud de las razones espectrales H/V (ver Tabla (5.2)). La segunda utilizando su relación empírica con V_{S30}

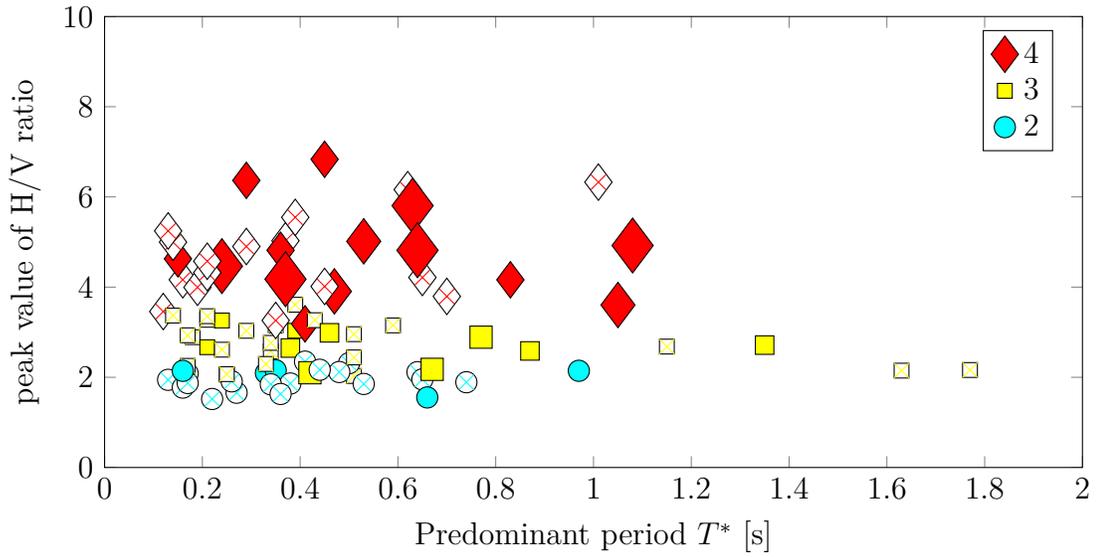
$$n = b_o \log \left(\frac{V_{S30}}{V_{ref}} \right) \quad (5.15)$$

donde $b_o = -2.1396$ y $V_{ref} = 1530$. Ésta última relación termina por definir un factor de amplificación a partir de una utilización complementaria de T^* y V_{S30} y no sustituta como se ha realizado en estudios anteriores. Se ha encontrado que ambos indicadores modelan de forma cualitativamente diferente el fenómeno de la amplificación, lo que justifica su uso conjunto e independiente.

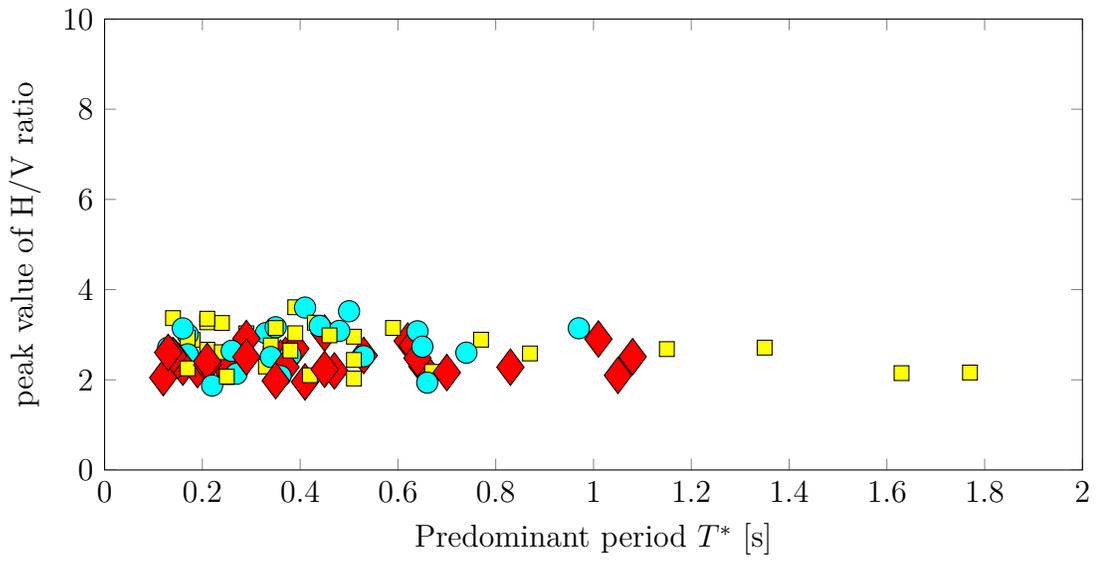
A partir de la forma y amplitud del factor de amplificación, se clasifican todas las estaciones sísmicas utilizadas en este estudio. Con números romanos I-VI se muestra la localización la amplificación dentro del rango de periodos, donde números más bajos indican periodos cortos y números altos periodos largos. Dos excepciones a esta norma son la clase I, de forma plana y la clase VI correspondiente a un suelo genérico de amplificación en banda ancha. Con los números 1-4 se muestra el nivel de la amplificación, siendo 1 inexistente y 4 la más alta. Adicionalmente se propone una clasificación binaria para estas mismas estaciones sísmicas, definida por dos sitios genéricos: roca y suelo.

Respecto a la norma chilena oficial de diseño sísmico de edificios NCh433.Of1996 modificada en 2012, se identifican algunas limitaciones en el espectro de aceleraciones que ésta propone debido al supuesto de equivalencia entre periodo fundamental y V_{S30} . En primera instancia, reproduce una relación inversa entre los tipos de suelo y su influencia en el PGA, donde suelos de periodos más cortos deberían resultar en mayores valores que suelos de periodo largo. En segundo lugar entrega una tendencia falsa que relaciona de manera directa el aumento del nivel de amplificación con el aumento del periodo fundamental. A la luz de éstas observaciones, se propone iniciar investigaciones que deriven en una modificación al espectro lineal elástico de la actual normativa, incorporando los efectos del comportamiento no lineal de suelos y definiendo una nueva descripción de los efectos de la amplificación dinámica, ya

sea utilizando de forma complementaria T^* y V_{S30} o en un caso simplificado una descripción conservadora sólo a partir de V_{S30} que sea teóricamente consistente.

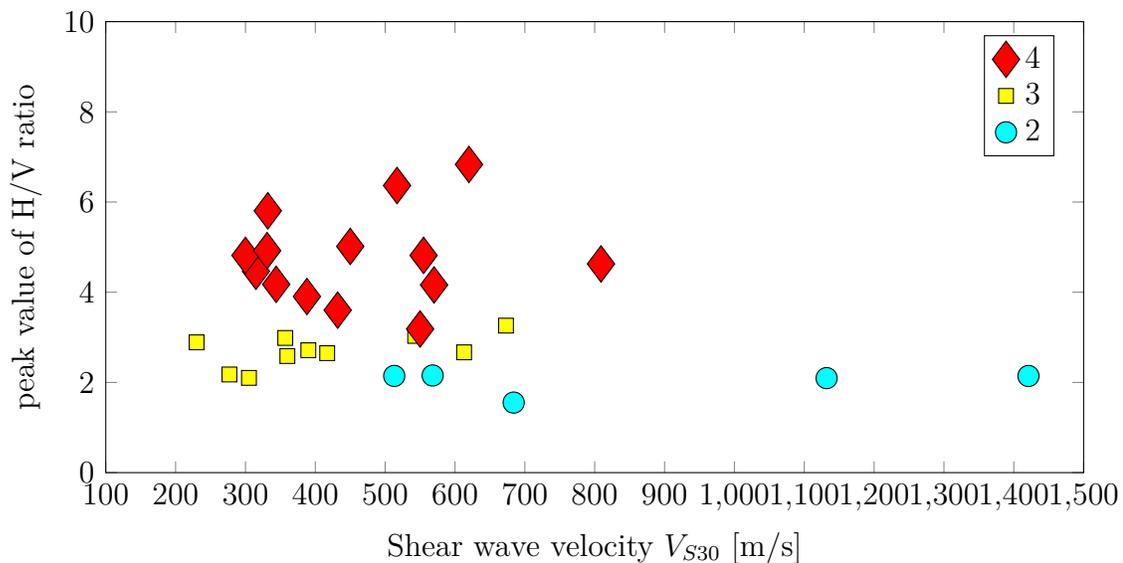


(a)

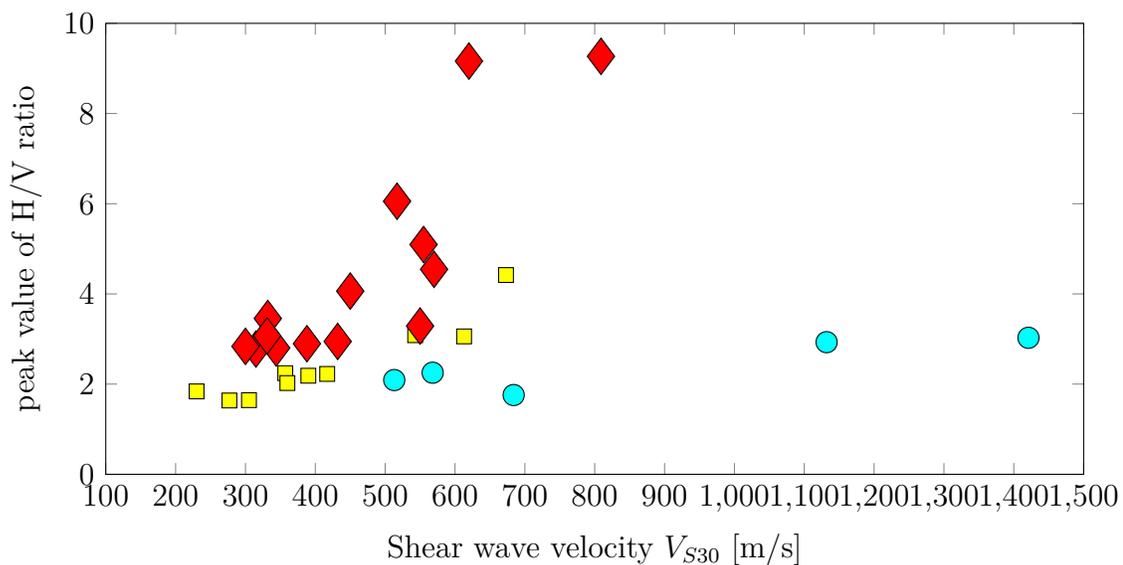


(b)

Figura 5.13: (a) Valores máximos de las razones espectrales H/V medias de cada estación versus el periodo predominante identificado. Han sido agrupadas según la segunda clasificación, no incluyendo las de clase 1. Símbolos de color sólido más grandes indican valores relativos más bajos de V_{S30} . Símbolos de relleno blanco y acompañados de una cruz indican estaciones sísmicas sin V_{S30} conocido. (b) Normalización a clase 3 de los valores máximos de las razones espectrales H/V medias según el valor n asociado a la clasificación de cada estación y la Tabla (5.5).



(a)



(b)

Figura 5.14: (a) Valores máximos de las razones espectrales H/V medias de cada estación versus V_{S30} . Se han incluido únicamente estaciones con V_{S30} conocidos. Han sido agrupadas según la segunda clasificación, no incluyendo las de clase 1. (b) Normalización a clase 3 de los valores máximos de las razones espectrales H/V medias según el valor n determinado por el modelo (5.13).

Capítulo 6

Curvas de atenuación de aceleraciones y desplazamientos espectrales para un 5 % de amortiguamiento, PGA y PGD

El área de la sismología aplicada a la generación de modelos predictivos de movimientos superficiales durante terremotos, conocidos como curvas de atenuación, se encuentra en constante desarrollo. Al gran número de trabajos existentes para las zonas de subducción, tanto los derivados para las características específicas de una región [GSWY02, GSH⁺05, ZZA⁺06, MZAS06, LL08, AGO⁺10, SPM⁺13] o los que pretenden funcionar de manera genérica para todo el mundo [CVS88, Cro91, YCSH97, AB03a, AGA15], se les suman nuevas publicaciones con cada nuevo gran terremoto, que trae consigo nuevos registros de movimientos superficiales. Su incorporación a las bases de datos de estos estudios permite generar modificaciones que posibilitan reproducir una porción más amplia de la diversidad de fenómenos asociados a los grandes terremotos posibles. Haciendo uso de los registros de aceleraciones de los últimos terremotos chilenos y de un nuevo estudio de factores empíricos de amplificación dinámica de suelos, se busca proponer un nuevo modelo de atenuación para terremotos interplaca e intraplaca en la zona de subducción chilena.

Con la intención de incluir los últimos avances en el desarrollo de estos modelos, se incorporan criterios similares a los de los proyectos internacionales de investigación *Global Earthquake Model* (GEM) [ABA⁺12] y *Next Generation of Ground-Motion Attenuation Models* (NGA) [PCA⁺08] del *Pacific Earthquake Engineering Research Center* (PEER). En específico la obtención de predicciones de movimiento superficial de osciladores con periodos que van desde 0.01 [s] hasta 10 [s] y la utilización de datos en amplios rangos de magnitudes y distancias. Además de la consideración de ciertos fenómenos importantes, como los efectos de saturación vistos en terremotos de grandes magnitudes para distancias cercanas a la fuente sísmica, las variaciones de las formas de atenuación respecto a diferentes mecanismos de falla, la consideración de la atenuación anelástica, las variaciones de la pendiente de atenuación en función de la magnitud, la utilización del parámetro V_{S30} como indicador del nivel de amplificación dinámica de suelos y la saturación con la magnitud [SDJ⁺15]. También la utilización del análisis de residuos como forma de evaluar la calidad de los resultados de las regresiones, definidos como la diferencia entre las observaciones y las predicciones agrupadas

en diferentes rangos de variables. Respecto a este último punto, el enfoque que se utiliza en este trabajo es una versión simplificada del método utilizado por *Scasserra et al.* [SSB⁺09] para evaluar el ajuste de diferentes modelos de atenuación a datos de Italia, que ha sido utilizado en derivaciones de otros modelos [BA08].

Respecto a la definición de la ecuación del funcional, se han privilegiado la utilización de formas simples [AB03a, BA08, AGA15]. Este criterio está motivado por querer evitar introducir complejidad redundante que implique un modelo con resultados más complejos de utilizar por terceros, generando además coeficientes sobreajustados a comportamientos sin sentido físico. Adicionalmente, estudios estadísticos de selección de modelos de atenuación para la determinación del peligro sísmico en base a registros de terremotos de la región específica, muestran resultados parciales donde las primeras posiciones de los ranking son ocupadas por los funcionales más simples [KA13].

6.1. Datos de regresiones

Además de los criterios de selección que definen la base de datos compilada y procesada en el capítulo 3, se realiza una nueva selección de subconjuntos de datos para utilizar en las regresiones. A partir de las distribuciones de aceleración y distancia de las Figuras (3.14), (3.15) y (4.13), es posible reconocer mayores niveles de dispersión en los grupos de magnitudes 5.0-6.0. Considerando que aquellos son poco relevantes para la determinación del peligro sísmico [AB03a], pues no logran generar movimientos superficiales que produzcan daño, su utilización íntegra en las regresiones supone una adición de sesgo poco justificada y que altera los resultados para magnitudes altas que son más relevantes. El cuadro asociado a las magnitudes $M_w = 5.0 - 5.5$ de la Figura (3.14) muestra una pérdida de densidad de datos inusual a partir de los 130 [km] aproximadamente, por lo que se decide descartar completamente. En la misma Figura, el cuadro asociado a las magnitudes $M_w = 5.5 - 6.0$ también posee un comportamiento inusual a partir de los 150 [km]. Para los terremotos interplaca de la Figura (3.15), una situación similar se repite en el cuadro asociado a las magnitudes $M_w = 5.5 - 6.0$, donde existe un comportamiento anómalo entre las distancias 100-200 [km].

Existe un fenómeno adicional que depende del tipo de instrumento utilizado para el registro, que introduce sesgos al incrementarse la distancia fuente-sitio. Mientras un grupo de las estaciones sísmicas registra de manera permanente el movimiento superficial, otro funciona a través de umbrales de aceleración mínimos que deben alcanzarse para iniciar la grabación. En el caso de este último grupo, considerando un evento cualquiera, existe una distancia para la cual instrumentos registran el movimiento y otros no. El resultado es un sesgo en el comportamiento general de la atenuación asociada a aquellas distancias [AGA15].

Ya sea para evitar el sesgo por el disparador del instrumento o para descartar comportamientos anómalos de los datos, se define un valor máximo de distancia fuente-sitio que depende del tipo de terremoto y de M_w , descartando los registros que lo exceden. Los valores utilizados se muestran en la Tabla (6.1) y son representados en las Figuras (3.14), (3.15) y (4.13) por las líneas punteadas verticales. El resultado son 157 registros asociados a 36 terre-

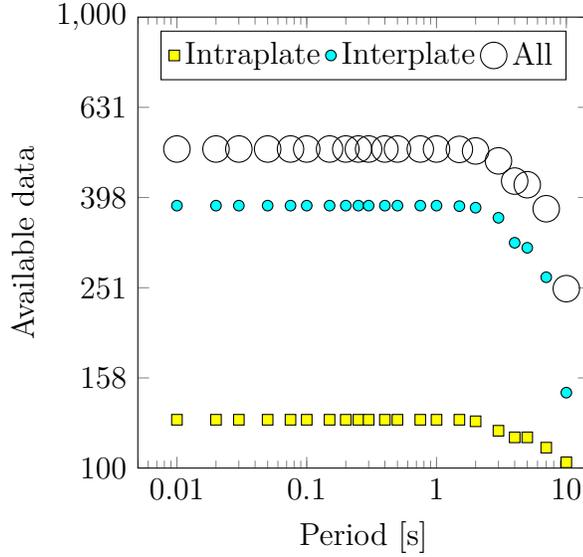


Figura 6.1: Cantidad de datos disponibles en función del periodo de la regresión.

Tabla 6.1: Definición de los valores de distancia-sitio máximos utilizados en las regresiones, en función de la magnitud M_w y el tipo de terremoto.

	Intraplaca	Interplaca
$5.5 \leq M_w \leq 6.0:$	$R_{hip} \leq 150$	$R_{rup} \leq 100$
$6.1 \leq M_w \leq 6.5:$	$R_{hip} \leq 300$	$R_{rup} \leq 150$
$6.6 \leq M_w \leq 7.5:$	$R_{hip} \leq 300$	$R_{rup} \leq 300$
$M_w \geq 7.6:$	$R_{hip} \leq 400$	$R_{rup} \leq 400$

motos intraplaca y 369 registros asociados a 64 terremotos interplaca que definen en el mejor de los casos el total de datos disponibles para las regresiones del modelo entre los periodos 0.01 [s] y 10 [s]. Considerando los límites espectrales del registro calculados en la sección 3.4, las cantidades de datos disponibles para las regresiones de cada periodo se muestran en la Figura (6.1). El cuadro izquierdo de la Figura (6.2) muestra los datos utilizados para la regresión de alta frecuencia y PGA, que posee la cantidad más alta, mientras que la parte derecha muestra los datos utilizados para la regresión de 10 [s], que posee la menor cantidad de todas.

6.2. Modelo de atenuación y funciones

El nivel de la intensidad de movimiento superficial generado por una fuente sísmica para un sitio cualquiera, se puede estimar por la medición de la acción de tres causas: a) el tamaño y características generales de la fuente sísmica F_F , b) los efectos de la trayectoria del viaje desde la fuente al sitio en cuestión F_D y c) los efectos locales de sitio F_S [BA08]. Cada una de ellas se puede cuantificar a través de una función que describa su nivel y forma de influencia en el movimiento superficial en función de las variables predictivas, lo que de manera general

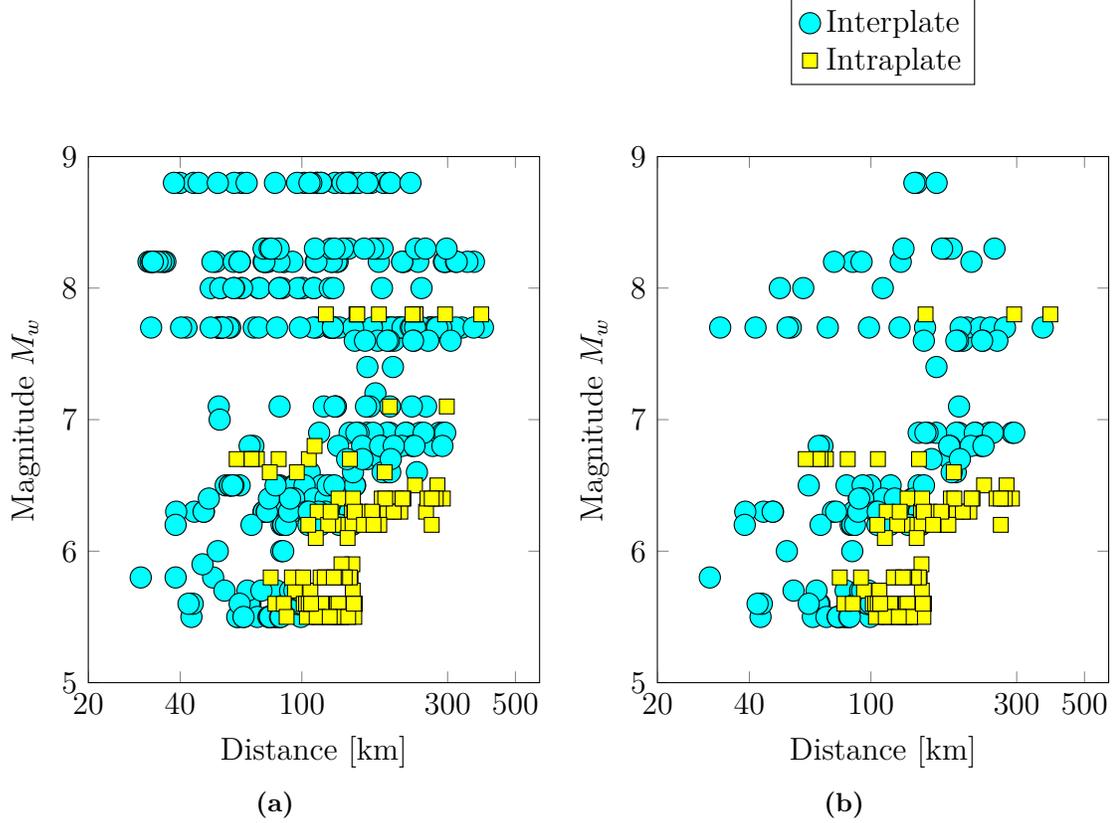


Figura 6.2: Muestra de los datos utilizados en las regresiones finales después de aplicar un corte por distancia en función de M_w . **(a)** Registros de aceleraciones disponibles para las regresiones de alta frecuencia y PGA, **(b)** registros de aceleraciones disponibles para la regresión de 10 [s].

se expresa por

$$\log Y = F_F(M_w, H, F_{eve}) + F_D(R, M_w, F_{eve}) + F_S(V_{S30}, \mu_o) \quad (6.1)$$

donde Y representa el valor máximo de la aceleración superficial del suelo o la respuesta de aceleración espectral para un amortiguamiento de 5% en $[g]$. La Figura (6.3) muestra una representación esquemática de a qué corresponde cada uno de los tres modelos dentro de un evento sísmico interplaca o intraplaca en la zona de subducción chilena.

6.2.1. Características de la fuente sísmica F_F

Para modelar los efectos de la fuente sísmica en la aceleración superficial, se utiliza una función que incorpora tres de sus características principales, siendo la primera el tamaño, cuyo indicador es la magnitud momento M_w , la segunda la profundidad focal H y la tercera el tipo de terremoto, cuyo indicador es un factor ficticio F_{eve} , que asume un valor 0 para interplaca y 1 para intraplaca. La ecuación que describe esta función es

$$F_F(M_w, H, F_{eve}) = c_1 + c_2 M_w + c_9 M_w^2 (1 - F_{eve}) + c_8 (H - h_o) F_{eve} + (\Delta c_1 + \Delta c_2 M_w) F_{eve} \quad (6.2)$$

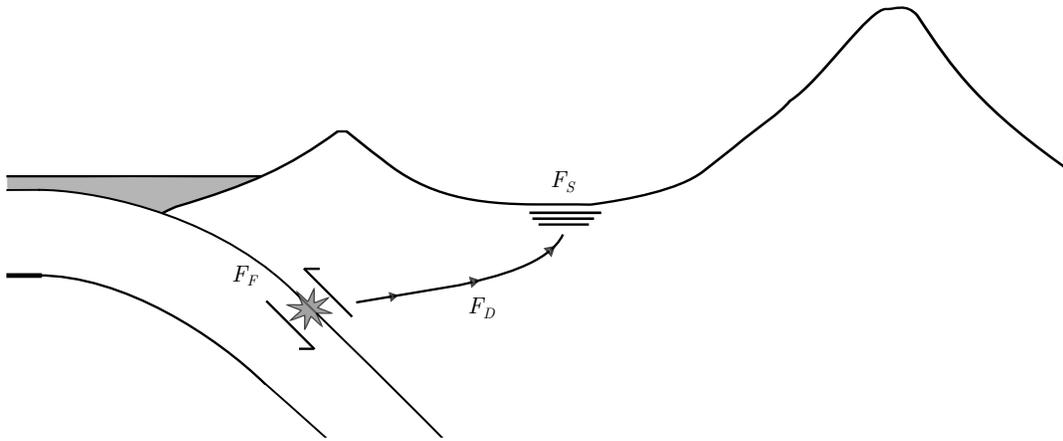


Figura 6.3: Representación de las causas del movimiento superficial por la acción de un sismo interplaca o intraplaca. F_F corresponde al modelo que cuantifica el aporte de la fuente sísmica, F_D el aporte según la distancia fuente-sitio y F_S el aporte debido a la amplificación dinámica del suelo en los últimos metros de la trayectoria.

donde c_1 , Δc_1 , c_2 , Δc_2 , c_8 y c_9 son coeficientes que se determinan en las regresiones de cada periodo y PGA.

El tipo de terremoto influye en el comportamiento de la función de dos formas diferentes. Como también consideran otros estudios [ZZA⁺06, BA08, AGA15], afecta a su valor base, definido en este caso por $c_1 + \Delta c_1 F_{eve}$. Además, de forma específica para los terremotos intraplaca, supone la incorporación de un término asociado a la profundidad focal H . En primera instancia se realizaron las regresiones sin él, pero a la luz de la evidencia de una clara tendencia en los residuos de terremotos intraplaca que muestra la Figura (6.4), se decide incorporar un término lineal para profundidades focales H entre 50 [km] y 100 [km]. Ya que los eventos intraplaca poseen profundidades focales mínimas cercanas a $h_o = 50$ [km], el límite inferior de los valores de $(H - h_o)F_{eve}$ será cercano a 0, mientras que su límite superior queda restringido al reemplazar los valores de $H > 100$ [km] por $H = 100$ [km].

La magnitud ha sido incorporada en otros estudios de forma lineal [AB03a, RS05, ZZA⁺06, CB12], cuadrática [ABB⁺12] o como una combinación de ambas [BA08, AGA15]. Para las regresiones iniciales se sigue el primer enfoque, que es posteriormente corregido agregando para eventos interplaca un término cuadrático a la versión final que ajusta mejor los datos, obteniendo menores desviaciones estándar de las regresiones.

6.2.2. Trayectoria fuente-sitio F_D

Desde que la onda de movimiento es generada en la fuente sísmica hasta una distancia suficientemente lejana donde es imperceptible, se desarrolla una atenuación de su amplitud proporcional a la distancia que recorre. Los dos fenómenos responsables de esta disminución energética son la *atenuación anelástica* asociada al término R y el *geometrical spreading* asociado al término $\log(R + R_o)$, cuya incidencia en la aceleración superficial la podemos

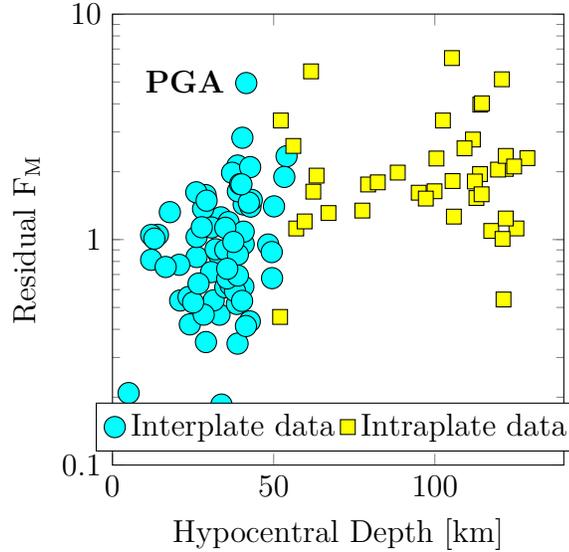


Figura 6.4: Residuos de la regresión de PGA en función de la profundidad focal.

Tabla 6.2: Valores asociados al término de saturación R_o para distancias cercanas a la fuente.

Coefficiente	Valor
c_6	5
c_7	0.35
M_r	5

cuantificar por

$$F_D(R, M_w, F_{eve}) = (c_3 + c_4[M_w - M_h] + \Delta c_3 F_{eve}) \log(R + R_o) + c_5 R \quad (6.3)$$

con

$$R_o = (1 - F_{eve}) c_6 \cdot 10^{c_7[M_w - M_r]} \quad (6.4)$$

donde R representa la distancia más cercana al área de ruptura para sismos interplaca y la distancia hipocentral para intraplaca. El parámetro R_o representa de manera ficticia la distancia aproximada desde la cual comienza a aplicarse el efecto del *geometrical spreading* y es mayor mientras mayor es el tamaño de la fuente indicado por M_w . A través de él se reproduce el efecto de saturación en la intensidad del movimiento superficial de sitios cercanos a la fuente, propios de terremotos con grandes áreas de ruptura. Como dicho efecto está asociado a fuentes extendidas, no se considera para terremotos intraplaca cuyas fuentes se han definido puntuales con anterioridad. Esta medida es confirmada por los datos al obtener regresiones con desviaciones estándar menores que las obtenidas en caso contrario. Los coeficientes c_6 y c_7 asociados a R_o no se obtienen por regresión y se consideran fijos para todo periodo T . Sus valores, que se muestran en la Tabla (6.2) junto con la magnitud de referencia M_r , se obtienen realizando diferentes iteraciones a partir de los valores obtenidos por *Abrahamson et al.* [AGA15], que conducen a regresiones de menores desviaciones estándar.

El término del *geometrical spreading*, ha sido considerado un coeficiente constante por algunos autores [RS05, ZZA⁺06, ABB⁺12] y dependiente de la magnitud y el tipo de terremoto

Tabla 6.3: Valores asociados al término representativo del *geométrical spreading*.

Coeficiente	Valor
c_4	0.1
M_h	5

por otros [AB03a, CB12, AGA15]. Siguiendo el segundo enfoque, se asume un valor base diferente para cada tipo de terremoto a través de $c_3 + \Delta c_3 F_{eve}$. Éste representa la pendiente de la gráfica de $\log Y$ versus $\log R$ para sismos de magnitud $M_h = 5$. Su valor aumenta con la magnitud M_w a través de un coeficiente $c_4 = 0.1$ utilizado por *Abrahamson et al.* [AGA15], constante para todo periodo T y para todo tipo de terremoto. Los coeficientes c_3 , Δc_3 y c_5 se determinan a través de regresiones para cada periodo y PGA. La Tabla (6.3) muestra los valores fijos utilizados en el término representativo del *geométrical spreading*.

6.2.3. Efectos de sitio F_S

Como parte de los efectos locales de sitio donde se quiere estimar el movimiento superficial, consideramos el modelo empírico de factores de amplificación dinámica desarrollado en el capítulo 5, cuya función respecto al logaritmo de la aceleración es

$$F_S(V_{S30}, T^*) = s(T^*) \log \left(\frac{V_{S30}}{V_{ref}} \right) \quad (6.5)$$

donde $V_{ref} = 1530$ [m/s] y V_{S30} representa la velocidad de onda de corte promedio hasta los 30 [m] de profundidad. Para valores de $V_{S30} > 1000$ [m/s] se debe utilizar $V_{S30} = 1000$ [m/s]. El coeficiente de forma de la amplificación se define como $s(T^*) = b_o \log \mu_o$, con $b_o = -2.1396$ y μ_o asumiendo los valores de la Tabla (5.6) según corresponda a cada sitio. Los resultados de $s(T^*)$ se muestran en la Tabla (6.4). Para rocas duras sin periodo identificable se tiene que $s = 0$ cualquiera sea T , mientras que suelos genéricos que presenten amplificación en banda ancha o no posean un periodo predominante claro su valor es $s = s_{VI}$. Aquellos sitios con periodos predominantes identificables, asumen valores según la Tabla (6.5).

6.3. Procedimiento de inversión y residuos

Para realizar las 22 regresiones necesarias y obtener los 8 coeficientes de cada caso, se utiliza el método de inversión de máxima verosimilitud de dos etapas propuesto por *Joyner y Boore* [JB93]. De manera general, en cada regresión se determinan dentro de la primera etapa los coeficientes asociados a variables predictivas interevento, de valores únicos para cada registro. En el caso del modelo descrito en la ecuación (6.1), serían los coeficientes de la función F_D . Los resultados de esta etapa entregan además, por las características del método propuesto, los valores representativos de aceleración normalizados por F_D para cada uno de los eventos, que permiten obtener en la segunda etapa los coeficientes asociados a variables predictivas intraevento. Éstas poseen valores únicos para cada terremoto y están relacionadas a los coeficientes de F_F considerando el modelo de atenuación de la ecuación

Tabla 6.4: Coeficientes de forma para la amplificación dinámica en función del periodo predominante del suelo

Periodo [s]	s_{II}	s_{III}	s_{IV}	s_V	s_{VI}
PGA	-0.584	-0.322	-0.109	-0.095	-0.212
0.01	-0.523	-0.262	-0.100	-0.092	-0.193
0.02	-0.459	-0.208	-0.092	-0.089	-0.177
0.03	-0.390	-0.160	-0.085	-0.088	-0.164
0.05	-0.306	-0.088	-0.075	-0.090	-0.146
0.07	-0.351	-0.056	-0.069	-0.096	-0.141
0.10	-0.524	-0.087	-0.070	-0.113	-0.156
0.15	-0.691	-0.336	-0.095	-0.166	-0.245
0.20	-0.671	-0.547	-0.127	-0.209	-0.359
0.25	-0.584	-0.674	-0.178	-0.235	-0.444
0.30	-0.506	-0.730	-0.258	-0.234	-0.491
0.40	-0.386	-0.718	-0.423	-0.164	-0.535
0.50	-0.300	-0.635	-0.537	-0.110	-0.557
0.75	-0.276	-0.395	-0.575	-0.358	-0.599
1.00	-0.275	-0.254	-0.462	-0.670	-0.584
1.50	-0.249	-0.238	-0.300	-0.801	-0.522
2.00	-0.218	-0.231	-0.220	-0.746	-0.479
3.00	-0.180	-0.219	-0.210	-0.628	-0.461
4.00	-0.171	-0.218	-0.212	-0.531	-0.448
5.00	-0.168	-0.218	-0.203	-0.438	-0.439
7.50	-0.168	-0.218	-0.153	-0.256	-0.435
10.00	-0.168	-0.218	-0.125	-0.231	-0.435

Tabla 6.5: Asignación de coeficientes de forma de la amplificación en función del periodo predominante.

Periodo predominante	Coeficiente de forma $s(T^*)$
$T^* \leq 0.2$ [s]	s_{II}
0.2 [s] $< T^* \leq 0.4$ [s]	s_{III}
0.4 [s] $< T^* \leq 0.8$ [s]	s_{IV}
0.8 [s] $< T^*$	s_V

(6.1). A diferencia del método que posee sólo una etapa de inversión, éste permite estudiar los residuos y desviaciones estándar de los modelos F_F y F_D por separado.

De forma más rigurosa, se busca resolver el problema general descrito por $\mathbf{y} = \mathbf{X}\mathbf{b} + \mathbf{e}$, donde en una primera etapa asume la forma específica $\mathbf{y}_1 = \mathbf{X}_1\mathbf{b}_1 + \mathbf{e}_1$, cuya solución corresponde al estimador $\hat{\mathbf{b}}_1$. El vector de residuos \mathbf{e}_1 , se asume como una variable Gaussiana independiente de media cero y varianza σ_r^2 , donde σ_r representa la desviación estándar entre registros. La solución del estimador se escribe [JB93]

$$\hat{\mathbf{b}}_1 = (\mathbf{X}_1^T \mathbf{X}_1)^{-1} \mathbf{X}_1^T \mathbf{y}_1 \quad (6.6)$$

donde el vector columna \mathbf{y}_1 corresponde a las observaciones de aceleraciones a las cuales se quiere ajustar la regresión, el vector columna $\hat{\mathbf{b}}_1$ a los resultados de los coeficientes concatenados con los valores de aceleraciones para invertir en la segunda etapa y \mathbf{X}_1 a una matriz función de las variables predictivas de cada registro.

Debido a la alta dispersión de los datos que se utilizan en general para el desarrollo de curvas de atenuación, resulta común que se produzcan *trade-offs* entre los coeficientes asociados a la atenuación anelástica y el *geometrical spreading* durante la inversión de la primera etapa. Esto puede llevar a obtener combinaciones de resultados de coeficientes poco reales, como por ejemplo atenuaciones anelásticas positivas. Una solución adoptada por otros autores [BA08, AGA15] consiste en realizar la inversión de la primera etapa más de una vez, fijando en el primer intento los coeficientes respectivos de alguno de los tipos de atenuación a valores reales y probables, ajustando con la regresión los asociados a la otra atenuación. Utilizando estos resultados, se puede realizar nuevamente la inversión de primera etapa para obtener a través de esta nueva regresión los valores de los coeficientes que habían sido fijados en la anterior. Siguiendo este enfoque, se realizan inversiones de primera etapa de datos de aceleraciones en todos los periodos y PGA considerando valores de $c_5 = -0.001$, $c_5 = -0.0015$ y $c_5 = -0.002$ para obtener los coeficientes c_3 y Δc_3 respectivos. Los mejores resultados, evaluados así por entregar la desviación estándar σ_r más baja, se obtuvieron con $c_5 = -0.0015$. A partir de los valores de c_3 y Δc_3 obtenidos con este procedimiento, los vectores y matrices de la inversión de primera etapa que determina el coeficiente c_5 restante se puede escribir como

$$\mathbf{y}_1 = \begin{bmatrix} \log Y_1 - [F_S]_1 - (c_3 + c_4([M_w]_1 - M_h) + \Delta c_3[F_{eve}]_1) \log(R_1 + [R_o]_1) \\ \log Y_2 - [F_S]_2 - (c_3 + c_4([M_w]_2 - M_h) + \Delta c_3[F_{eve}]_2) \log(R_2 + [R_o]_2) \\ \vdots \\ \log Y_N - [F_S]_N - (c_3 + c_4([M_w]_N - M_h) + \Delta c_3[F_{eve}]_N) \log(R_N + [R_o]_N) \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

$$\mathbf{b}_1 = \begin{bmatrix} c_5 \\ [\hat{F}_F]_1 \\ \vdots \\ [\hat{F}_F]_{N_e} \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Tabla 6.6: Desviación estándar y coeficientes asociados a la función de trayectoria fuente-sitio F_D obtenidos a partir de la inversión de la primera etapa.

Periodo [s]	c_3	c_5	Δc_3	σ_r
PGA	-0.97558	-0.00174	-0.52745	0.232
0.01	-1.02993	-0.00175	-0.50466	0.231
0.02	-1.08567	-0.00176	-0.48043	0.233
0.03	-1.15951	-0.00176	-0.42490	0.235
0.05	-1.28640	-0.00178	-0.31239	0.241
0.07	-1.34644	-0.00181	-0.17995	0.251
0.10	-1.32353	-0.00182	-0.13208	0.255
0.15	-1.17687	-0.00183	-0.26451	0.255
0.20	-1.04508	-0.00182	-0.39105	0.268
0.25	-0.94363	-0.00178	-0.34348	0.264
0.30	-0.84814	-0.00173	-0.36695	0.260
0.40	-0.69278	-0.00166	-0.46301	0.263
0.50	-0.57899	-0.00161	-0.54098	0.261
0.75	-0.56887	-0.00158	-0.46266	0.252
1.00	-0.53282	-0.00154	-0.42314	0.247
1.50	-0.46263	-0.00145	-0.58519	0.246
2.00	-0.40594	-0.00139	-0.65999	0.245
3.00	-0.33957	-0.00137	-0.79004	0.231
4.00	-0.26479	-0.00137	-0.86545	0.228
5.00	-0.22333	-0.00137	-0.88735	0.232
7.50	-0.30346	-0.00131	-0.91259	0.231
10.00	-0.33771	-0.00117	-0.96363	0.204

$$\mathbf{X}_1 = \begin{bmatrix} R_1 & E_{11} & E_{12} & \cdots & E_{1N_e} \\ R_2 & E_{21} & E_{22} & \cdots & E_{2N_e} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_N & E_{N1} & E_{N2} & \cdots & E_{NN_e} \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

donde N corresponde al número total de registros y N_e al número total de eventos. Los parámetros E_{ij} asumen un valor igual a 1 cuando el registro i corresponde al evento j y un valor igual a 0 si no corresponde. Los coeficientes finales obtenidos para esta primera etapa, que se asocian a la función de trayectoria fuente-sitio F_D , pueden verse en la Tabla (6.6). La Figura (6.5) muestra los residuos de los datos utilizados en seis regresiones en función de la distancia de la fuente sísmica al sitio, definido como el cociente entre la aceleración observada y la proyectada por el modelo ajustado. Se encuentran agrupados en cuatro rangos diferentes de M_w , donde para cada uno de ellos no es posible notar que existan tendencias claras que indiquen comportamientos relacionados con la distancia no reproducidos en el modelo. La Figura (6.6) muestra los mismos residuos pero agrupados por tipo de suelo definido según T^* , donde tampoco es posible notar alguna tendencia.

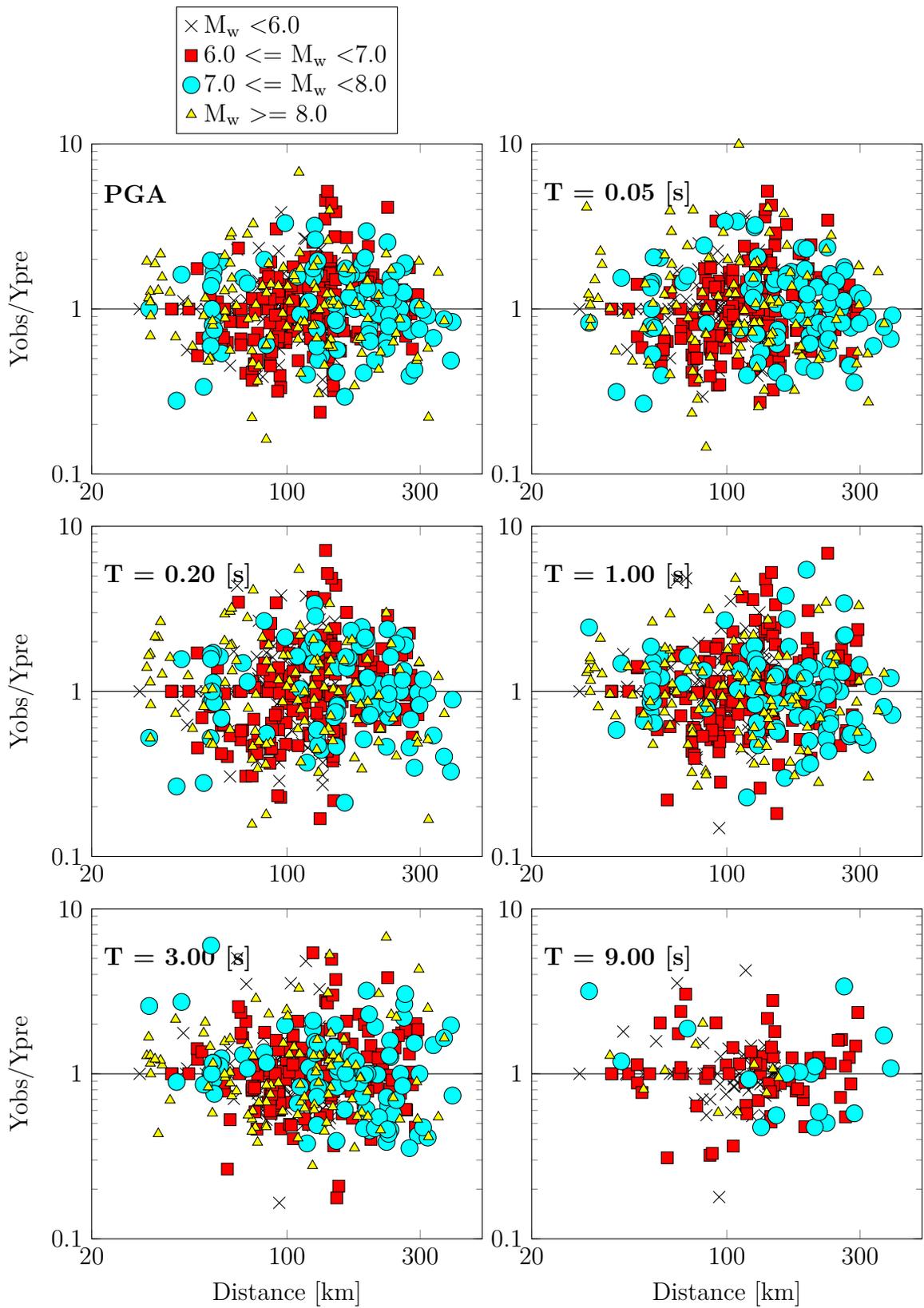


Figura 6.5: Residuos obtenidos en la primera etapa del procedimiento de inversión en función de la distancia de la fuente sísmica al sitio y agrupados en rangos de M_w .

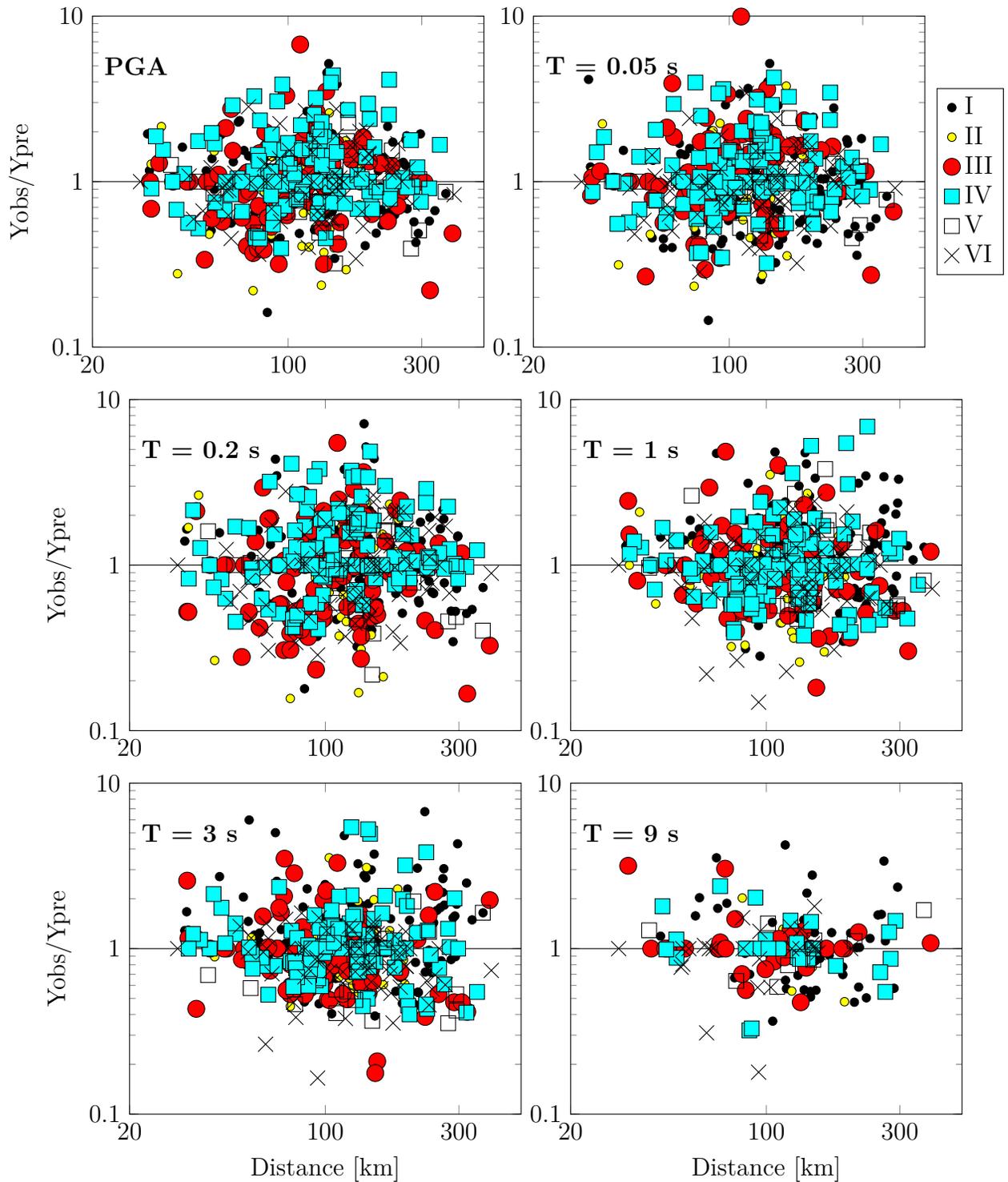


Figura 6.6: Residuos obtenidos en la primera etapa del procedimiento de inversión en función de la distancia de la fuente sísmica al sitio y agrupados por tipo de suelo definido según T^* .

Para la segunda etapa, se resuelve el problema análogo $\mathbf{y}_2 = \mathbf{X}_2 \mathbf{b}_2 + \mathbf{e}_2$, cuya solución se puede obtener a partir del estimador $\hat{\mathbf{b}}_2$ definido por [JB93]

$$\hat{\mathbf{b}}_2 = (\mathbf{X}_2^T \mathbf{W} \mathbf{X}_2)^{-1} \mathbf{X}_2^T \mathbf{W} \mathbf{y}_2 \quad (6.10)$$

donde \mathbf{W} corresponde a una matriz de pesos de los datos asociados a cada uno de los eventos. Las formas de calcularla son variadas, donde destacan al menos tres:

- (1) Una combinación entre una matriz diagonal que pondera de manera uniforme cada evento y la varianza de $\hat{F}_F - F_F$, de la forma [JB93]

$$\mathbf{W} = (\text{var}(\hat{F}_F - F_F) + \sigma_e^2 \mathbf{I})^{-1} \quad (6.11)$$

En este caso, la inversa \mathbf{W}^{-1} corresponde a la matriz de varianza-covarianza del vector de residuos de la segunda etapa $\mathbf{e}_2 = \boldsymbol{\varepsilon}_e + \hat{F}_F(-F_F)$. Además, se puede considerar que $\left[\text{var}(\hat{F}_F - F_F) \right]_{ik} = \left[\text{var}(\hat{\mathbf{b}}_1) \right]_{i+\text{rank}(\mathbf{X}_2), k+\text{rank}(\mathbf{X}_2)}$, siendo $\text{var}(\hat{\mathbf{b}}_1) = (\mathbf{X}_1^T \mathbf{X}_1)^{-1} \sigma_r^2$.

- (2) Una matriz diagonal de ponderación nula para eventos con un sólo registro y uniforme para el resto, donde cada término se calcula por [JB81]

$$w_i = \begin{cases} 1/\sigma_e^2 & \text{si } R_i > 1 \\ 0 & \text{si } R_i = 1 \end{cases} \quad (6.12)$$

El parámetro R_i corresponde al número de registros del evento i .

- (3) Una matriz diagonal en función del número de registros que posee cada evento, cuyos términos se calculan por [JB93]

$$w_i = (\sigma_r^2/R_i + \sigma_e^2)^{-1} \quad (6.13)$$

$$E \left[(\mathbf{y}_2 - \mathbf{X}_2 \hat{\mathbf{b}}_2)^T \mathbf{W} (\mathbf{y}_2 - \mathbf{X}_2 \hat{\mathbf{b}}_2) \right] = N - \text{rank}(\mathbf{X}_2) \quad (6.14)$$

Seleccionada una forma de calcular \mathbf{W} , el problema se reduce a obtener el valor de la varianza σ_e^2 que cumple (6.14), a través de un acercamiento iterativo con el procedimiento de la bisección, evaluando en cada caso (6.10) y \mathbf{W} . Utilizando los resultados de la primera etapa, el problema específico a resolver se define por

$$\mathbf{y}_2 = \begin{bmatrix} [\hat{F}_F]_1 \\ [\hat{F}_F]_2 \\ \vdots \\ [\hat{F}_F]_{N_e} \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

$$\mathbf{b}_2 = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_9 \\ c_8 \\ \Delta c_1 \end{bmatrix} \quad (6.16)$$

$$\mathbf{X}_2 = \begin{bmatrix} 1 & [M_w]_1 & [M_w^2]_1 & (H_1 - h_o)[F_{eve}]_1 & [F_{eve}]_1 \\ 1 & [M_w]_2 & [M_w^2]_2 & (H_2 - h_o)[F_{eve}]_2 & [F_{eve}]_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & [M_w]_{N_e} & [M_w^2]_{N_e} & (H_{N_e} - h_o)[F_{eve}]_{N_e} & [F_{eve}]_{N_e} \end{bmatrix} \quad (6.17)$$

Se realizan inversiones separadas utilizando las tres definiciones de \mathbf{W} antes expuestas, obteniendo conclusiones similares a las de *Joyner y Boore* [JB93]. Mientras las definiciones (1) y (3) dan resultados bastante similares, la (2) genera la menor desviación estándar σ_e de las tres, por lo que se decide utilizar ésta en las inversiones definitivas.

Los resultados de la segunda etapa se muestran en la Tabla (6.7), además de la desviación estándar del procedimiento completo, que se calcula de la forma $\sigma_t = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_r^2}$. La Figura (6.7) muestra el ajuste de la función F_F , evaluada con los coeficientes obtenidos, a los valores \hat{F}_F determinados en la primera etapa y agrupados por tipo de terremoto. Se han normalizado todos los datos descontando los efectos específicos sobre F_F de la profundidad, además de descartar aquellos puntos asociados a eventos de sólo un registro. En general es posible notar una dispersión más alta en los puntos de menor magnitud, los que comúnmente poseen menores cantidades de registros. Respecto a la forma del modelo, a medida que aumenta el periodo de la regresión, el término cuadrático cobra mayor importancia, lo que implica una saturación del aporte de la fuente para magnitudes altas. Producto de este mismo efecto, en la mayoría de los cuadros es posible observar una disminución abrupta de pendiente para $M_w \geq 7.5$, que podría motivar futuras mejoras del modelo utilizando una función definida por tramos [BA08]. El término cuadrático se agrega como una forma de representar el efecto de saturación con la magnitud, visto en los datos de eventos interplaca. Ya sea porque en el caso intraplaca las magnitudes disponibles son menores o porque la saturación se relaciona con la distribución espacial de la liberación de energía, diferente según el tipo de mecanismo, los datos de la Figura (6.7) no dan cuenta de un comportamiento cuadrático claro para intraplaca, por lo que se decide mantener su representación lineal.

Una vez obtenidos todos los resultados de coeficientes, se aplica un método de suavizado de ajuste lineal a las curvas que representan el valor de cada uno de ellos según el periodo. La Tabla (6.8) muestra un resumen de los pasos ejecutados en todo el procedimiento.

6.4. Evaluación de resultados

Ajustados todos los coeficientes de las funciones F_F y F_D , más los entregados por el estudio empírico previo de amplificación dinámica para la función F_S , es posible generar estimaciones de aceleraciones de PGA y aceleraciones máximas espectrales para osciladores con un 5% de amortiguamiento de periodos desde 0.01 [s] a 10 [s] a través de la ecuación (6.1). La Figura (6.8) muestra su evaluación en función de la distancia para sismos interplaca de magnitudes M_w 6, 7 y 8, considerando un sitio roca (I) en todos los casos. Para cada una de las tres curvas, se han incluido los datos de eventos interplaca asociados a la magnitud respectiva $+/- 0.3$. En ellas se observa que las formas de la atenuación cambian tanto al variar la magnitud como el periodo de observación. Menores valores de magnitud implican menores valores de aceleración, diferencia que aumenta a medida que aumenta también la distancia.

Tabla 6.7: Desviación estándar y coeficientes asociados a la función de fuente sísmica F_F obtenidos a partir de la inversión de la segunda etapa. Se incluye además la desviación estándar del procedimiento completo σ_t .

Periodo [s]	c_1	c_2	c_9	c_8	Δc_1	Δc_2	σ_e	σ_t
PGA	-2.8548	0.7741	-0.03958	0.00586	2.5699	-0.4761	0.172	0.289
0.01	-2.8424	0.8052	-0.04135	0.00584	2.7370	-0.5191	0.173	0.288
0.02	-2.8337	0.8383	-0.04325	0.00583	2.9087	-0.5640	0.176	0.292
0.03	-2.8235	0.8838	-0.04595	0.00586	3.0735	-0.6227	0.178	0.295
0.05	-2.7358	0.9539	-0.05033	0.00621	3.2147	-0.7079	0.190	0.307
0.07	-2.6004	0.9808	-0.05225	0.00603	3.0851	-0.7425	0.213	0.329
0.10	-2.4891	0.9544	-0.05060	0.00571	2.8091	-0.7055	0.195	0.321
0.15	-2.6505	0.9232	-0.04879	0.00560	2.6260	-0.6270	0.160	0.302
0.20	-3.0096	0.9426	-0.05034	0.00573	2.6063	-0.5976	0.157	0.310
0.25	-3.3321	0.9578	-0.05143	0.00507	2.3654	-0.5820	0.142	0.299
0.30	-3.5422	0.9441	-0.05052	0.00428	2.2017	-0.5412	0.141	0.296
0.40	-3.3985	0.7773	-0.03885	0.00308	1.6367	-0.3448	0.157	0.306
0.50	-2.8041	0.5069	-0.01973	0.00257	0.7621	-0.0617	0.152	0.302
0.75	-4.4588	0.8691	-0.04179	0.00135	2.1003	-0.4349	0.146	0.291
1.00	-5.3391	1.0167	-0.04999	0.00045	2.5610	-0.5678	0.153	0.290
1.50	-6.1204	1.1005	-0.05426	0.00068	2.8923	-0.5898	0.152	0.289
2.00	-7.0334	1.2501	-0.06356	0.00051	3.3941	-0.7009	0.157	0.291
3.00	-8.2507	1.4652	-0.07797	0.00066	4.0033	-0.8465	0.155	0.279
4.00	-8.7433	1.4827	-0.07863	0.00063	3.9337	-0.8134	0.160	0.279
5.00	-8.9927	1.4630	-0.07638	0.00067	3.7576	-0.7642	0.167	0.286
7.50	-9.8245	1.6383	-0.08620	0.00108	4.3948	-0.9313	0.164	0.283
10.00	-9.8671	1.5877	-0.08168	0.00014	4.3875	-0.8892	0.176	0.270

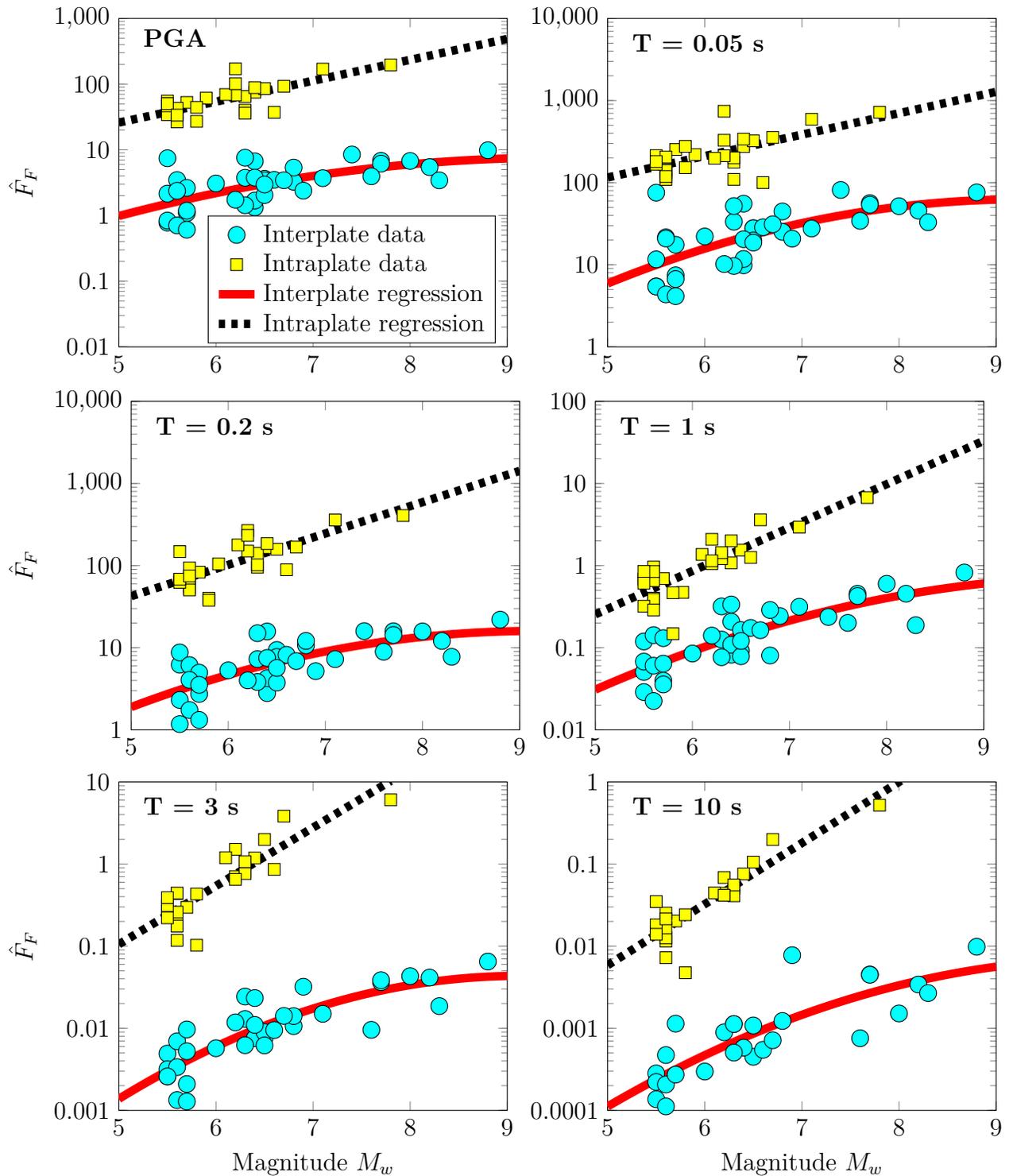


Figura 6.7: Evaluación de la función F_F utilizando los resultados de la segunda etapa de inversión. Los círculos y cuadrados representan los datos \hat{F}_F para sismos interplaca e intraplaca respectivamente obtenidos de la primera etapa de inversión.

Respecto a las variaciones con el periodo, en general las mayores aceleraciones se encuentran aproximadamente en los 0.05 [s] y decrecen de forma importante al moverse hacia periodos más largos. Adicionalmente la pendiente de la atenuación también disminuye en el mismo

Tabla 6.8: Resumen del procedimiento de inversión utilizado.

entrada:	Variables predictivas de registros y eventos
(1) etapa I:	Cálculo de la matriz de relación E entre las variables predictivas de registros y eventos.
(2)	Definición de \mathbf{y}_0 , \mathbf{b}_0 y \mathbf{X}_0 , fijando el valor de $c_5 = -0.0015$.
(3)	Obtención de los coeficientes c_3 y Δc_3 a través del estimador $\hat{\mathbf{b}}_0$ utilizando (6.6).
(4)	Definición de \mathbf{y}_1 , \mathbf{b}_2 y \mathbf{X}_{30} dejando libre el valor de c_5 y fijando los valores de c_3 y Δc_3 en los resultados del paso anterior.
(5)	Obtención del coeficiente c_5 a través del estimador $\hat{\mathbf{b}}_1$ utilizando (6.6).
(6) etapa II:	Definición de \mathbf{y}_2 , \mathbf{b}_2 y \mathbf{X}_2 .
(7)	A partir de un valor inicial arbitrario para σ_e^2 , iterar mediante el método de la bisección hasta encontrar el valor que resuelve (6.14), evaluando \mathbf{W} a través de una de sus tres definiciones y (6.10).
(8)	Suavizado de las curvas de coeficientes obtenidos en función del periodo.
salida:	Los coeficientes de las Tablas (6.6) y (6.7)

sentido, dando a lugar a curvas cada vez más planas asociadas a periodos cada vez más largos. En cada una de las curvas de la Figura (6.8), éstas ajustan de buena forma los datos observados, pasando por el centro de sus nubes respectivas. La Figura (6.9) muestra la misma evaluación anterior pero para terremotos intraplaca, obteniendo buenos ajustes en general. La curva de $T = 3$ [s] de la Figura (6.9) pasa por sobre los datos pues estos corresponden a un único sismo intraplaca $M_w = 7.8$.

Para los mismos periodos, la Figura (6.10) muestra las variaciones en las curvas de atenuación debido a los efectos locales de diferentes tipos de suelo, según la clasificación de periodo predominante T^* utilizada en este estudio. Se ha considerado una magnitud M_w 8.5 en el caso de eventos interplaca y M_w 7.5 para intraplaca, además de un $V_{S30} = 400$ [m/s], equivalente a un $n = 1.25$ para las clases II y V. Dentro del comportamiento específico de cada tipo de terremoto, los efectos del suelo son los mismos. Siendo la clase I el suelo de referencia tipo roca desde el cual se miden los efectos de los otros suelos y donde se ha considerado que la amplificación dinámica es aproximadamente nula, corresponde a la que registra las menores aceleraciones en todos los periodos. Existe una alternancia entre las clases II y V respecto a cuál posee mayores aceleraciones, donde para periodos cortos como PGA o 0.05 [s], es mayor la clase II, mientras que en periodos largos como 1 [s] ó 3 [s], resulta mayor la clase V. Este comportamiento es coherente con la forma de los factores empíricos de amplificación determinados en el capítulo 5 y mostrados en la Figura (5.9). No existe variación de este comportamiento respecto a la distancia, pues tal como se ha considerado en este estudio, la amplificación dinámica corresponde a un fenómeno local que actúa sobre una onda de movimiento cuando ésta entra en contacto con el suelo en los últimos metros antes de emerger a la superficie. Por lo tanto, como los comportamientos asociados al nivel de atenuación según la trayectoria de la onda y descritos por la función F_D , actúan en uno y dos ordenes de magnitud superiores al de los comportamientos de amplificación dinámica

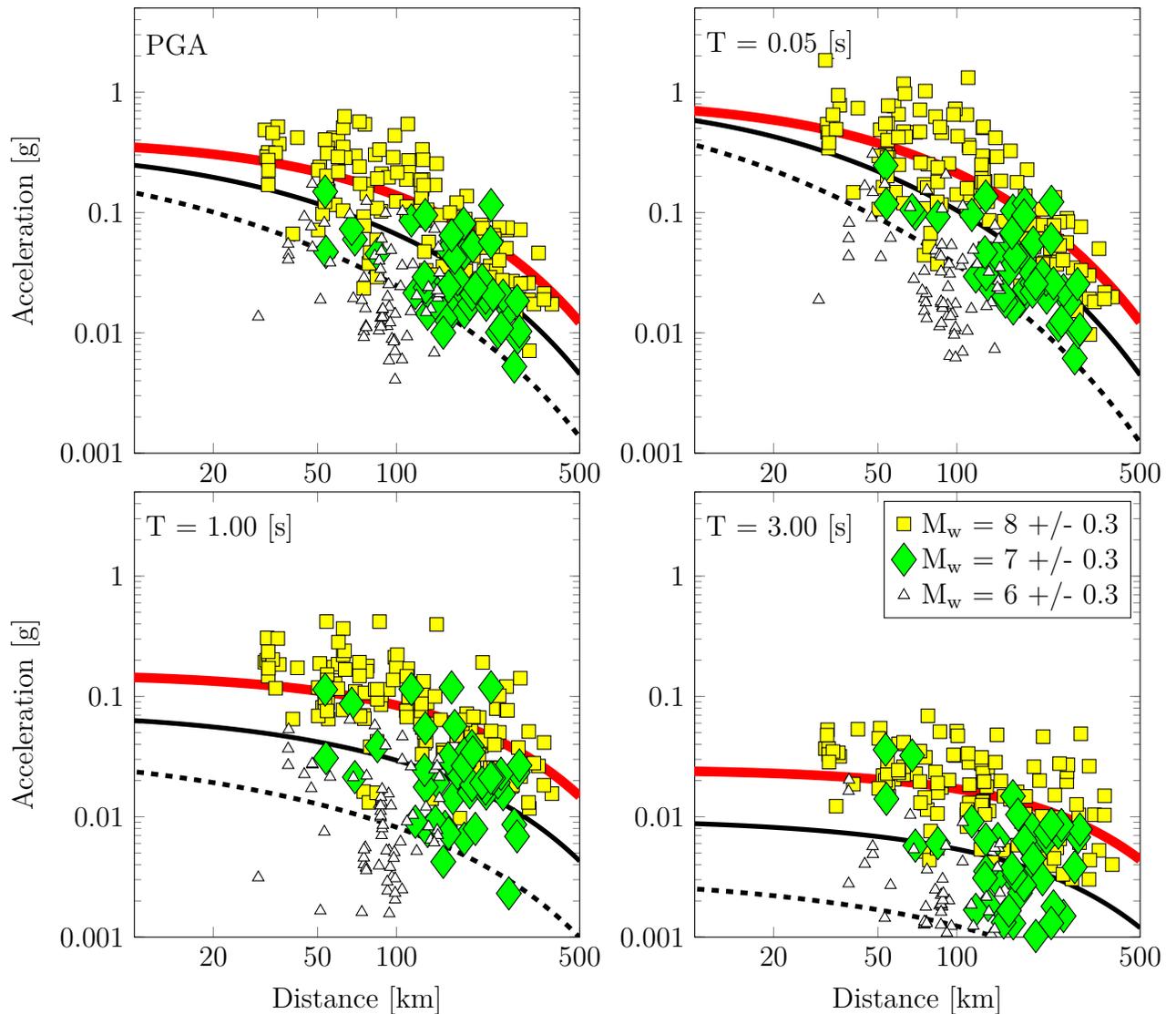


Figura 6.8: Evaluación de curvas de atenuación **interplaca** para diferentes magnitudes y periodos, considerando un sitio tipo roca. La curva sólida gruesa corresponde a $M_w = 8.0$, la sólida delgada a $M_w = 7.0$ y la segmentada a $M_w = 6.0$.

descritos por F_S , se considera que estos últimos no tienen efecto sobre los primeros.

Las clases III, IV y VI no se han incluido en la Figura (6.10) con la intención de no saturar la imagen, sin embargo, su comportamiento es proporcional a lo ya comentado, considerando la forma específica de sus factores empíricos de amplificación respectivos. Los efectos en la atenuación según variaciones de V_{S30} o n modifican la amplitud del comportamiento ya descrito, manteniendo la validez de todas las observaciones. Valores de V_{S30} menores a 400 [m/s] implican mayores diferencias de las curvas con la clase I, manteniendo las mismas posiciones relativas entre sí, mientras que valores mayores a 400 [m/s] implican una Figura con curvas más juntas.

La Figura (6.11) muestra la evaluación de los resultados de terremotos interplaca en su forma espectral para periodos que van desde 0.01 [s] hasta los 10 [s], utilizando cuatro

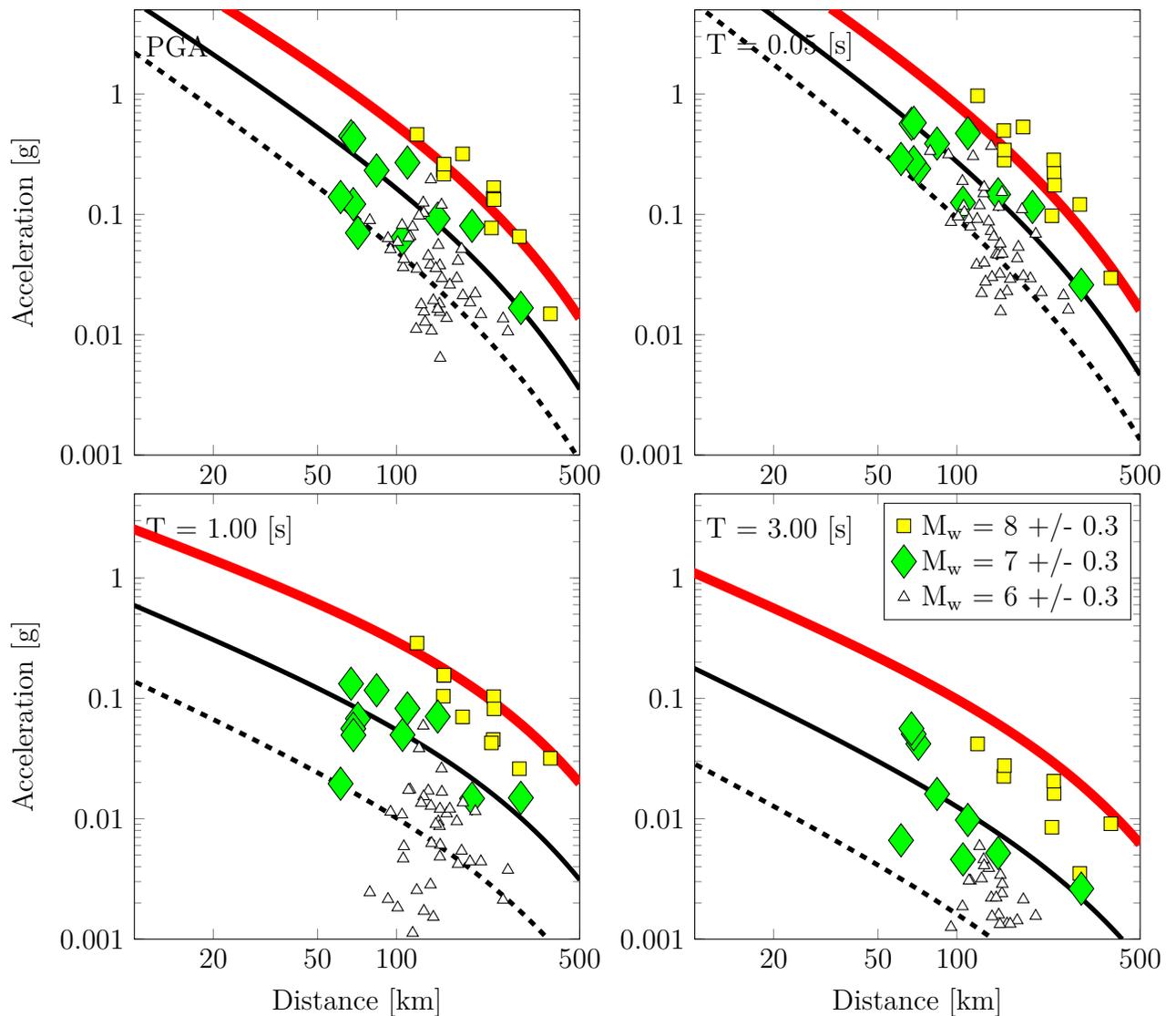


Figura 6.9: Evaluación de curvas de atenuación **intraplaca** para diferentes magnitudes y periodos, considerando un sitio tipo roca. La curva sólida gruesa corresponde a $M_w = 8.0$, la sólida delgada a $M_w = 7.0$ y la segmentada a $M_w = 6.0$.

diferentes magnitudes y distancias a la fuente sísmica y considerando un suelo tipo roca en todos los casos. Se observa un comportamiento suave que alcanza su valor máximo en los 0.15 [s] aproximadamente, mientras que su mínimo en 10 [s]. Para todo el rango de periodos el espectro escala su amplitud ante variaciones de M_w en relación directa, manteniendo su forma en las distancias lejanas y $M_w \leq 8$. Para las magnitudes más altas la forma es ligeramente más plana producto del efecto de saturación de grandes terremotos interplaca en sitios próximos a la fuente sísmica, efecto que es más notorio en los cuadros de distancias R menores. La Figura (6.12) muestra los mismos espectros pero separados en diferentes cuadros por magnitud. Es posible observar la misma forma suave que se va aplastando a medida que aumenta la magnitud. Adicionalmente, en cada cuadro es posible distinguir un desplazamiento del valor máximo hacia periodos más largos a medida que aumenta la distancia del sitio a la fuente sísmica. Aquel efecto es coherente con lo observado anteriormente en la Figura (6.8), que

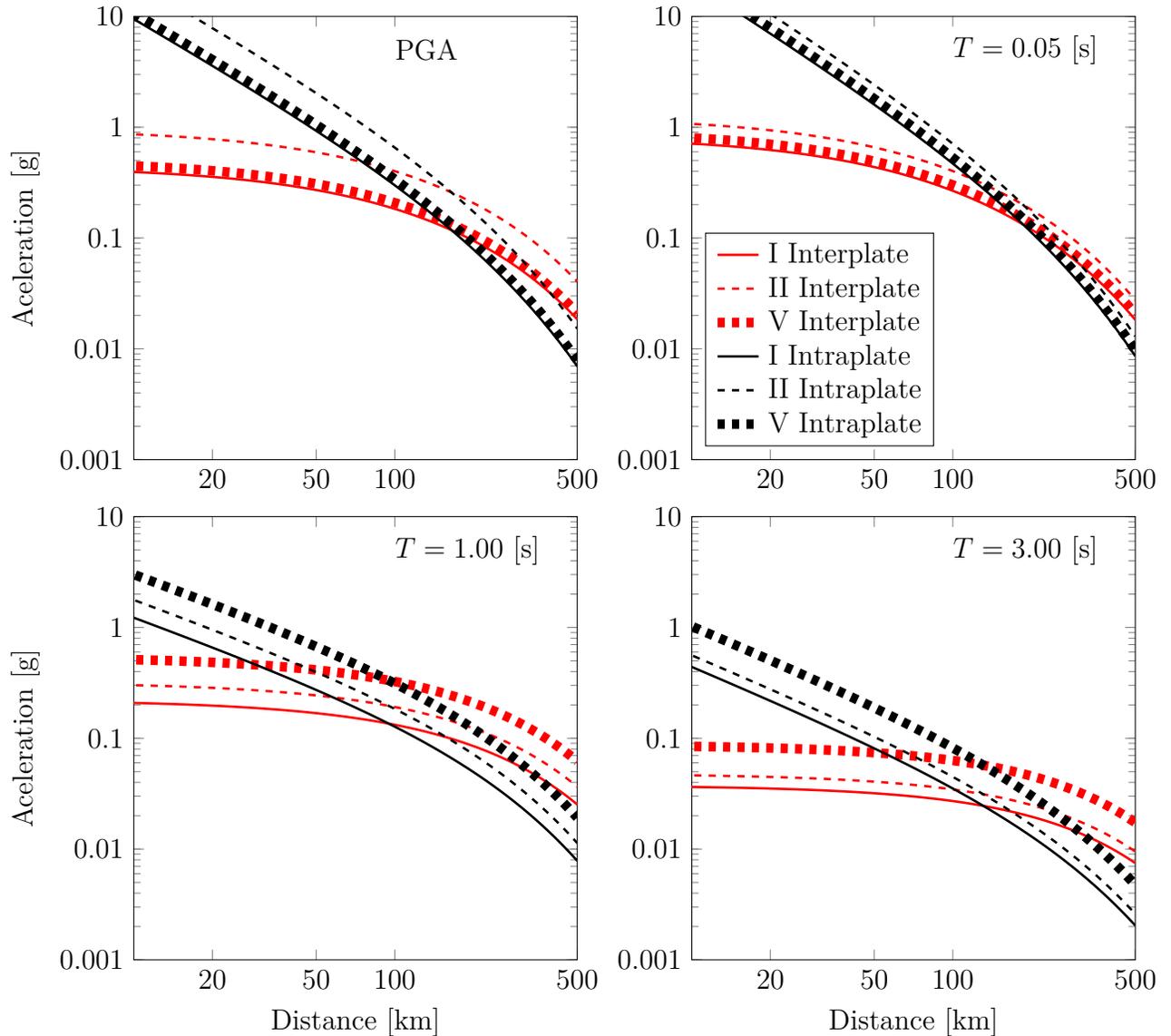


Figura 6.10: Variación de las curvas de atenuación de terremotos interplaca e intraplaca respecto a diferentes tipos de suelo clasificados según el periodo predominante T^* . Se ha considerado un valor de $V_{S30} = 400$ [m/s] para todos los casos. Para la curva de terremotos interplaca se considera $M_w = 8.5$, mientras que para la curva de terremotos intraplaca $M_w = 7.5$.

indica que las aceleraciones de periodos más cortos atenúan “antes o más rápido” que las de periodos largos, con independencia de la magnitud.

Con la intención de evaluar los efectos en las aceleraciones espectrales de los diferentes tipos de suelo clasificados según el periodo predominante T^* , la Figura (6.13) muestra las evaluaciones de las curvas de atenuación de en su forma espectral para un terremoto interplaca M_w 8.5 en un sitio a 50 [km] del área de ruptura y para un terremoto intraplaca M_w 7.5 en un sitio a 100 [km] de la fuente sísmica. En ambos casos, los espectros asociados a suelos tipo roca o clase I poseen las menores amplitudes en todo el rango de periodos. Los espectros de los sitios de clase II inducen un aumento del nivel de aceleraciones respecto a la clase I

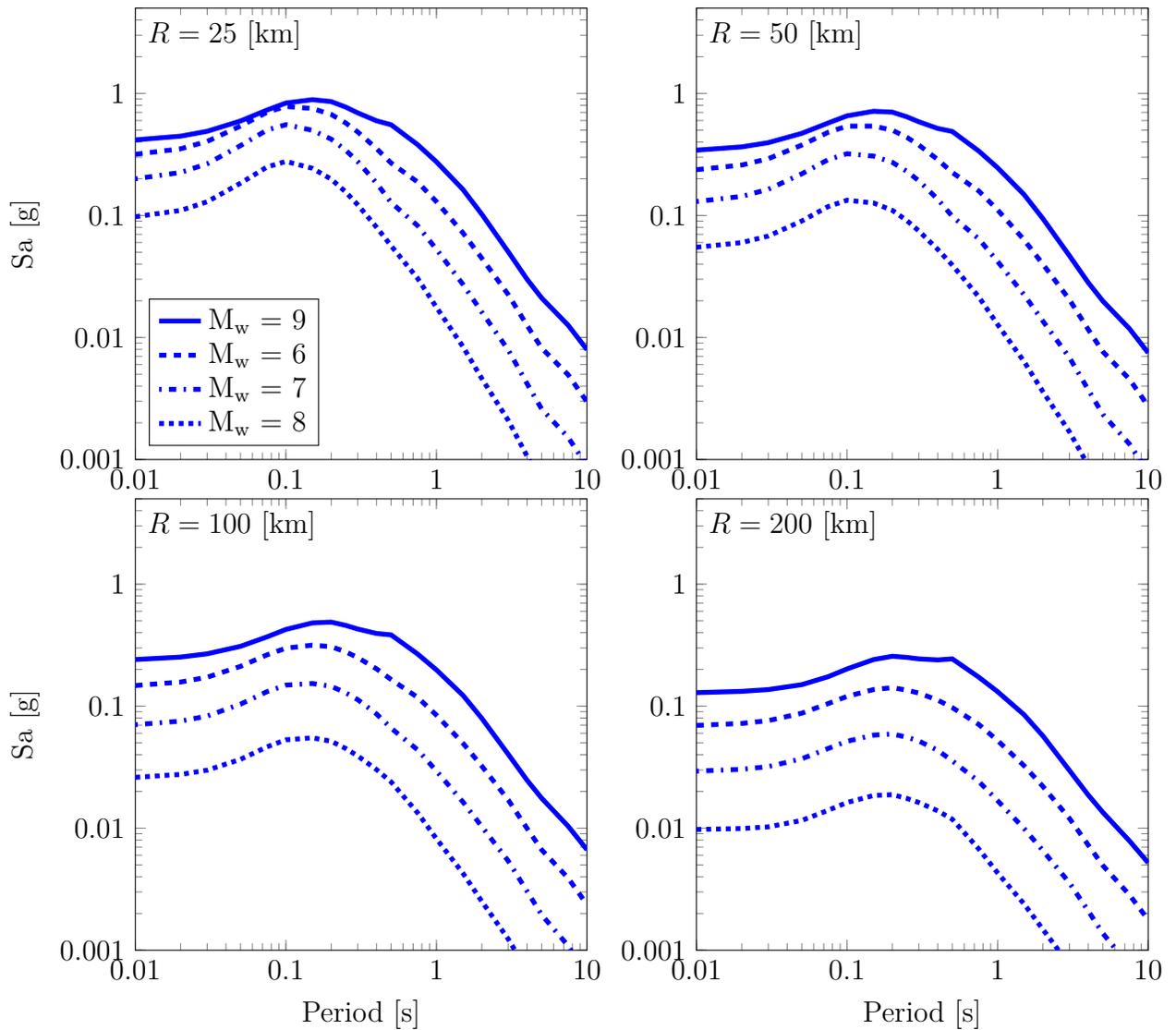


Figura 6.11: Forma espectral de la evaluación de las curvas de atenuación de terremotos interplaca, utilizando diferentes magnitudes y distancias de la fuente sísmica al sitio. Se considera un suelo tipo roca en todos los casos y cuatro casos de distancia constante y magnitud variable.

concentrado en un rango de periodos cortos, mientras que el espectro de clase V concentra su aumento de aceleraciones en valores de periodos largos cercanos a 1 [s]. Como en el caso anterior, se ha considerado que estos dos últimos sitios poseen un $V_{S30} = 400$ [m/s], que de ser menor implicaría un aumento generalizado de los niveles de amplificación y de ser mayor una disminución, manteniendo sus formas y validez de las descripciones realizadas respecto a ellas. Considerando que la función F_S no depende de M_w ni de la distancia R , los efectos de la amplificación dinámica son los mismos a pesar que el sitio pueda estar en otra posición respecto a la fuente sísmica o que esta tenga un tamaño diferente al indicado en la Figura (6.13). Sin embargo, ya que las aceleraciones espectrales se escriben de la forma $Y = Y_o 10^{F_S}$, éstas dependen de M_w y R a través de Y_o , que corresponde a las aceleraciones espectrales en roca o sitios de clase I y cuyas variaciones respecto a la magnitud y la distancia

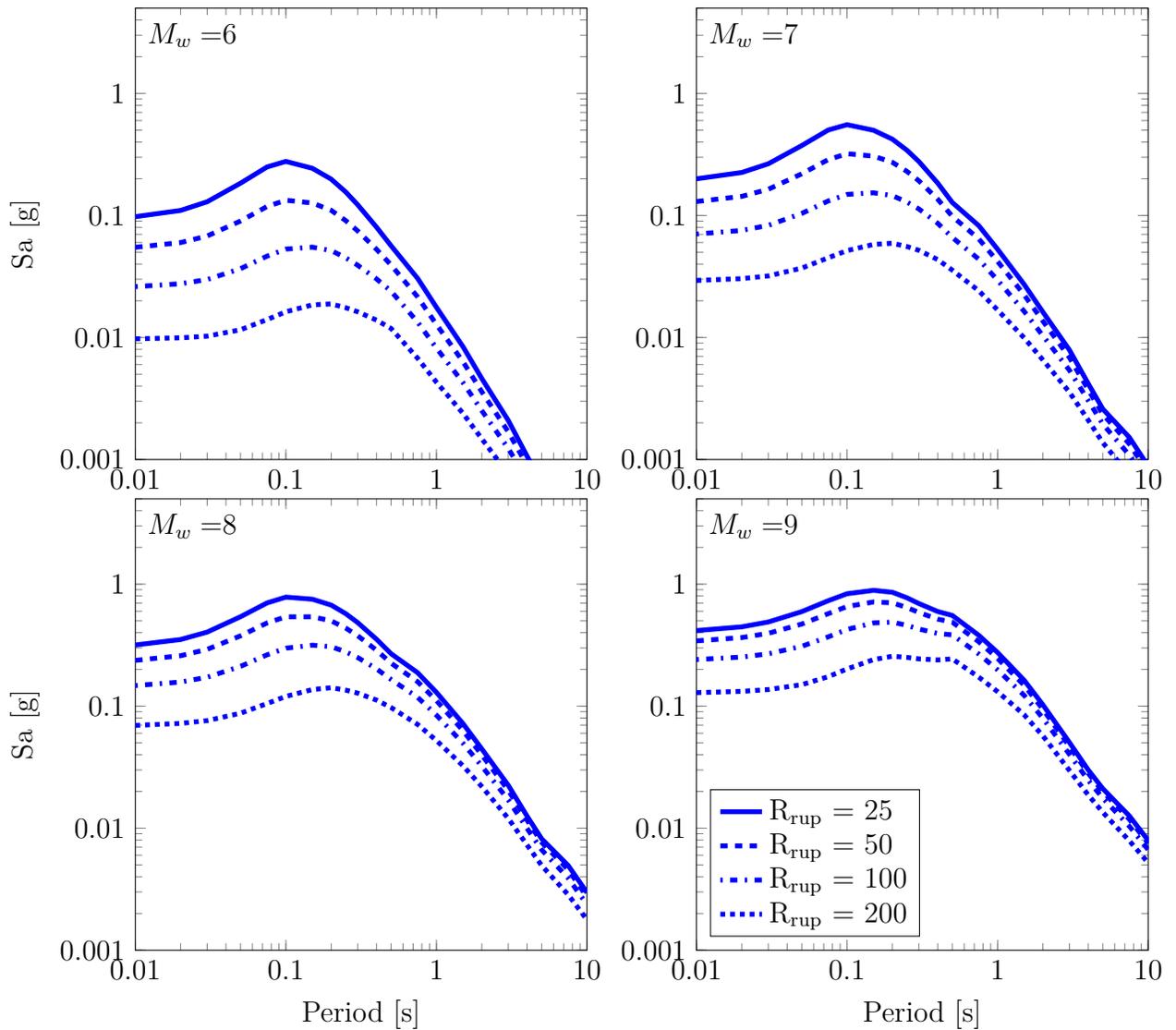


Figura 6.12: Forma espectral de la evaluación de las curvas de atenuación de terremotos interplaca, utilizando diferentes magnitudes y distancias de la fuente sísmica al sitio. Se considera un suelo tipo roca en todos los casos y cuatro casos de magnitud constante y distancia variable.

se evaluaron en las Figuras (6.11) y (6.12) para terremotos interplaca. Esta determinación independiente del espectro de aceleraciones en un afloramiento rocoso $Y_o = 10^{F_F+F_D}$ de los efectos de la amplificación dinámica F_S , permite reproducir espectros en una variedad de formas y amplitudes superior a las desarrolladas por estudios de curvas de atenuación espectrales anteriores. Desde espectros con amplificación en periodos cortos asociados a un sitio clase II, hasta espectros con amplificación en periodos largos de clase V que desarrollan dos puntas, donde una corresponde al contenido promedio de energía del sismo y la segunda al efecto causado por la amplificación dinámica cuyo nivel es inversamente proporcional a V_{S30} .

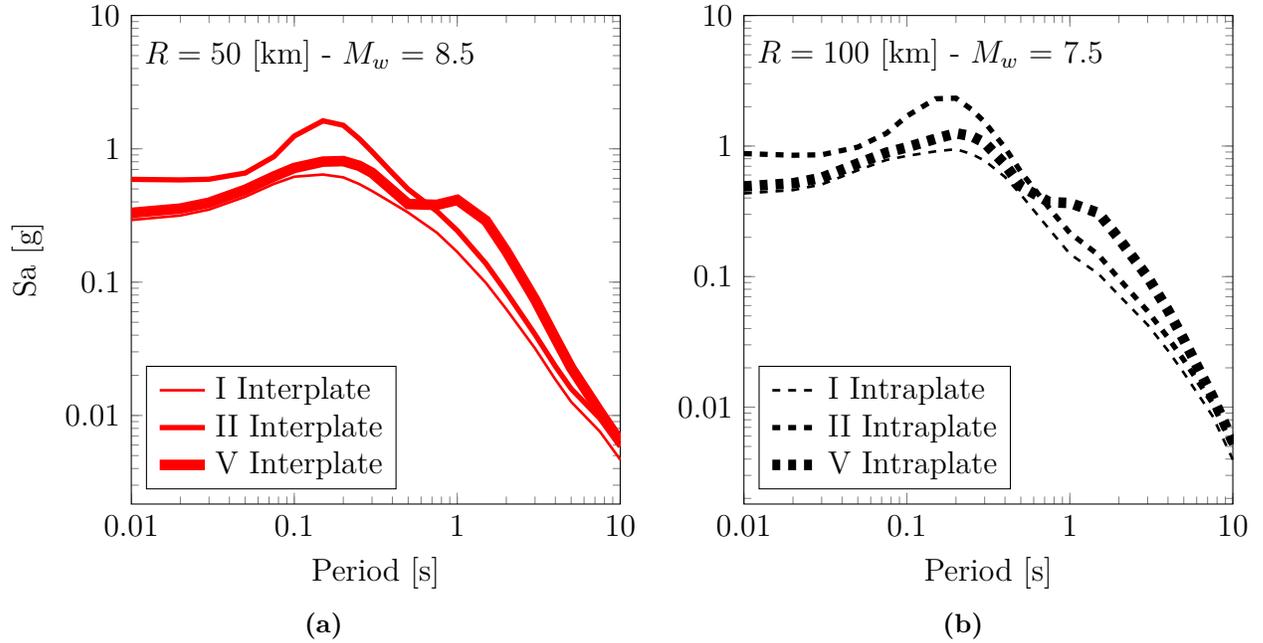


Figura 6.13: Evaluación espectral de las curvas de atenuación para terremotos (a) interplaca y (b) intraplaca en función de la clasificación del sitio según su periodo predominante T^* .

6.4.1. Comparación con otros estudios

Para finalizar la evaluación de los resultados obtenidos, se les compara con tres estudios de curvas de atenuación derivadas de datos de terremotos interplaca e intraplaca de diversas regiones subductivas del mundo [AB03a, AB03b, ZZA⁺06, AGA15], que han sido recientemente seleccionadas por uno de los equipos de expertos del GEM [SDJ⁺15] como recomendación para la determinación del peligro sísmico en zonas subductivas. Se incluyen además estudios anteriores específicos de la zona de subducción chilena y a sus datos asociados disponibles a la fecha de sus publicaciones [RS05, CB12]. La Figura (6.14) muestra dicha comparación considerando las características del terremoto interplaca del Maule 2010 $M_w = 8.8$, sobre un suelo lo más cercano posible a roca según las definiciones de cada modelo. Se han elegido tres periodos donde todos los autores reporten coeficientes, además del PGA. Los resultados de *Atkinson y Boore* [AB03a, AB03b] poseen en general una forma similar para los periodos mostrados cuando se los compara a los de este estudio, el que sin embargo entrega mayores valores generales para PGA y una atenuación notoriamente más rápida en periodos largos de 2 [s]. La atenuación más rápida para periodos mayores a 1 [s] se interpreta como una característica específica de la base de datos chilena, al ser reproducida también por los resultados de *Contreras y Boroschek* [CB12]. Respecto a este último estudio, las formas obtenidas también son similares, mostrando éste una pendiente de la atenuación más plana en periodos cortos y valores generales de PGA más bajos, sobre todo en distancias cercanas a la fuente sísmica. La diferencia de resultados de valores mayores para periodos cortos y PGA de este estudio respecto a *Contreras y Boroschek* y *Atkinson y Boore*, se explica en parte por dos causas al menos. La primera por la forma en que se ha considerado el efecto de saturación para distancias cercanas respecto a los dos anteriores. La segunda, debido a la implementación dentro de este estudio de las nuevas metodologías propuestas por diversos trabajos de *Boore*

[BB05, Boo05, BG14] que en específico implican no utilizar filtros pasa bajo en muchos casos de instrumentos digitales modernos. Ésta situación trae como consecuencia extraer valores más altos de PGA a partir de los mismos registros, sobre todo en estaciones instaladas sobre rocas rígidas, con menores capacidades disipativas de vibraciones de alta frecuencia que suelos blandos.

El estudio desarrollado por *Ruiz y Saragoni* [RS05] corresponde a otro trabajo que utiliza datos de terremotos chilenos para su derivación. Éste entrega valores únicamente para PGA, los cuales son superiores a cualquier otro estudio. Su derivación es previa a la ocurrencia de los terremotos Maule 2010, Iquique 2014 y Illapel 2015.

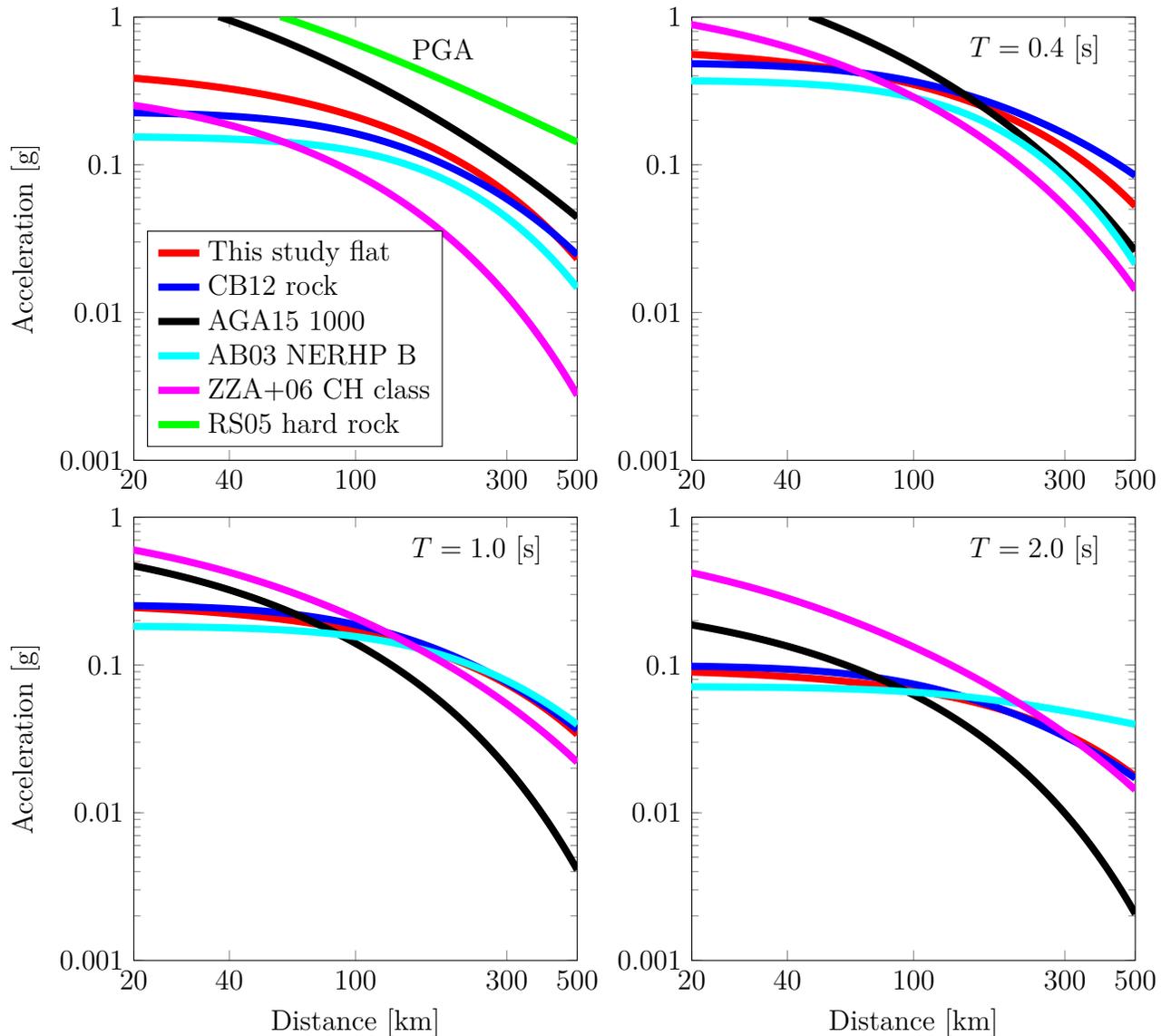


Figura 6.14: Evaluación de diferentes curvas de atenuación para terremotos **interplaca** en diferentes periodos y PGA. Se considera una fuente de $M_w = 8.8$ y $H = 28.1$ [km] correspondiente a las características del sismo del **Maule 2010**.

Las curvas de *Zhao et al.* [ZZA+06] de la Figura (6.14) poseen una forma diferente al resto, con una clara pendiente más pronunciada en los cuatro periodos mostrados y un efecto

de saturación de distancias cercanas a la fuente sísmica más débil. Las mayores similitudes se alcanzan en la curva de 1 [s], estando la de PGA por debajo de las tres anteriores y la de 2 [s] por sobre. La diferencia de las pendientes de atenuación entre *Atkinson y Boore* y *Zhao et al.* ha sido reportada en estudios anteriores de comparación de modelos de atenuación [SMG⁺13, SDJ⁺15], explicándose en gran parte por un efecto de variación regional de las características de los datos utilizados en ambos estudios. En el de *Zhao et al.*, casi el total de estos provienen de terremotos de Japón, mientras que en el de *Atkinson y Boore* una parte importante corresponde a terremotos de América Central y Sudamérica. Considerando los resultados de la Figura (6.14), se confirma en parte esta observación respecto a las pendientes de atenuación de terremotos interplaca asociados a Chile y Japón, donde los primeros mantienen una atenuación más lenta que los segundos, asegurando niveles importantes de intensidad de movimiento en extensiones de territorio de mayor extensión. Sin embargo, para todos los periodos, las pendientes de atenuación son igual o más inclinadas que las reportadas por *Atkinson y Boore*. Ésto supone una corrección respecto a cuestionamientos realizados al comportamiento excesivamente plano de la atenuación de este modelo, sobre todo para PGA y periodos iguales y mayores a 2 [s], considerado como poco realista por algunos autores y expertos internacionales [SDJ⁺15].

El modelo con mayores diferencias, tanto con los resultados de este estudio como con los demás, es el de *Abrahamson et al.* [AGA15]. La pendiente de la atenuación del modelo es la más pronunciada de todas, lo que se traduce en valores subestimados para distancias largas y sobreestimados para distancias cortas. En el caso de PGA, donde la pendiente parece ser similar, falla en reproducir la intensidad de movimiento para terremotos chilenos por poseer un efecto de saturación efectivo demasiado débil para las distancias cercanas a la fuente sísmica. En menor proporción que *Zhao et al.*, este modelo también posee una parte importante de datos de terremotos de Japón en la base de datos utilizada en su derivación, reproduciendo una atenuación demasiado inclinada para la atenuación achatada de los terremotos interplaca observados en la región chilena.

La Figura (6.15) muestra la evaluación del mismo grupo de estudios para un sismo intraplaca con características similares al terremoto de Tarapacá 2005 $M_w = 7.8$ y profundidad de foco $H = 105.5$ [km]. Se obtienen valores cercanos a los reportados por *Atkinson y Boore* para PGA y periodos largos, mientras que para periodos intermedios los resultados son algo mayores. Considerando que el ajuste de la curva a los datos de PGA mostrado en la Figura (6.9) es bueno y que además coincide con los resultados de *Atkinson y Boore*, se considera que las predicciones realizadas por *Abrahamson et al.* sobreestiman el PGA de terremotos chilenos intraplaca y las de *Zhao et al.* lo subestiman. Para los 0.4 [s] existe una clara coincidencia con las predicciones de *Abrahamson et al.* Para las curvas de 1 [s], todos los estudios mostrados tienen a mostrar resultados similares dentro de una franja estable, siendo los de este estudio algo mayores en distancias largas. En general, las curvas de terremotos intraplaca obtenidas poseen una pendiente de la atenuación similar a los estudios de comparación, existiendo desplazamientos totales hacia arriba y abajo. Ya que sólo se cuenta con el terremoto de Tarapacá 2005 dentro de los grandes eventos intraplaca registrados, nuevas investigaciones incorporando datos de otras regiones similares o de próximos terremotos intraplaca que ocurran en la región pueden generar variaciones significativas en los resultados obtenidos.

Como última comparación se desea evaluar las predicciones de este estudio para diferentes

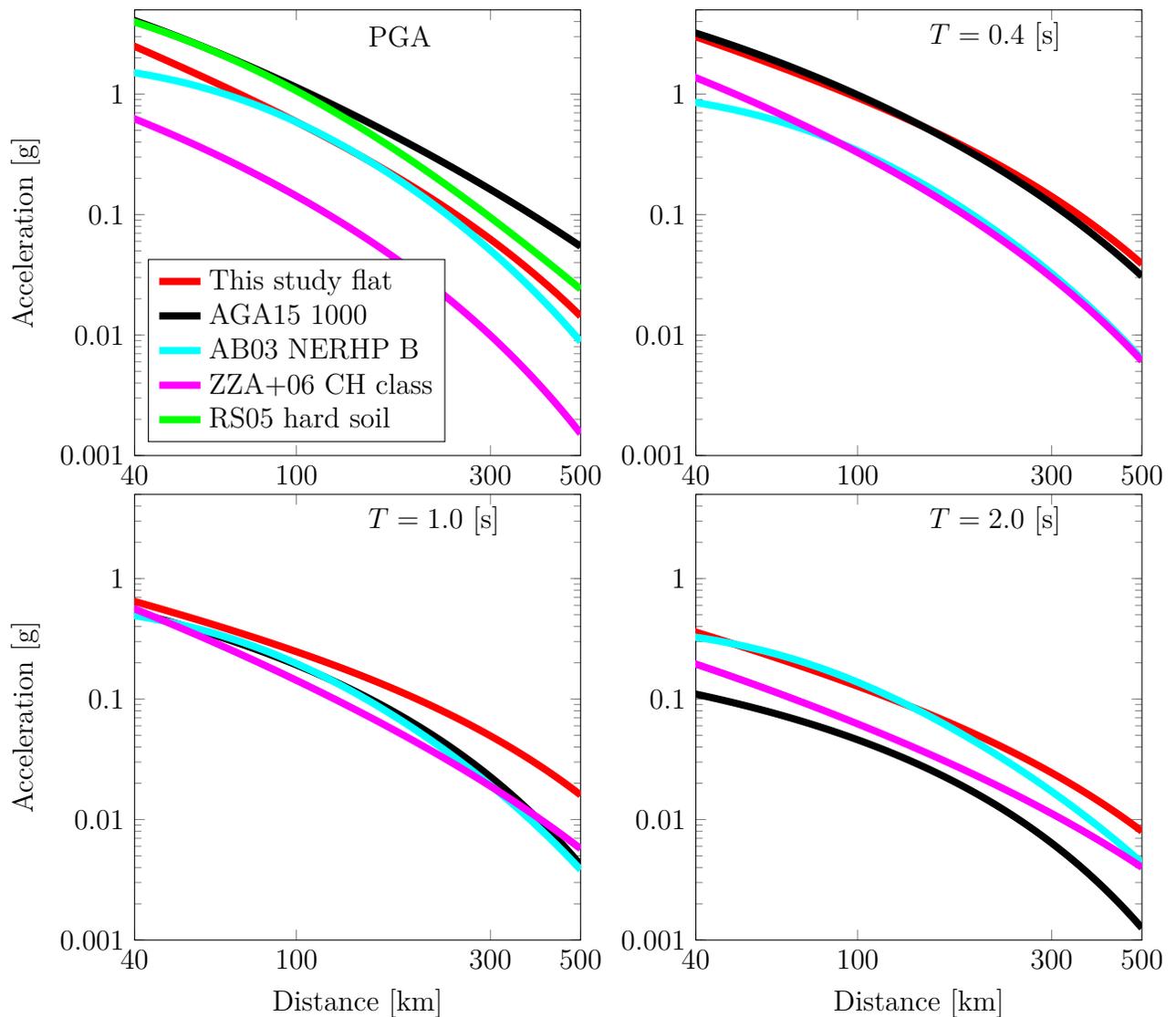


Figura 6.15: Evaluación de diferentes curvas de atenuación para terremotos **intraplaca** en diferentes periodos y PGA. Se considera una fuente de $M_w = 7.8$ y $H = 105.5$ [km] correspondiente a las características del sismo de **Tarapacá 2005**.

tipos de suelo y tipos de terremotos, respecto a los resultados reportados por los estudios ya citados. Para tal efecto la Figura (6.16) muestra la media geométrica de los espectros de aceleraciones amortiguados a un 5% de las componentes horizontales de seis registros de aceleraciones obtenidos en diferentes estaciones sísmicas, donde tres corresponden al terremoto del Maule 2010 y otros tres al terremoto de Iquique 2014. Se han agregado junto a cada uno de los espectros las formas espectrales de las curvas de atenuación de los estudios anteriores, considerando los indicadores que describen las características del tipo de suelo de la estación, que se muestran en la Tabla (A.2), y la distancia más cercana al área de ruptura del terremoto. Para las estaciones T05A, MET y PICA, los ajustes del espectro son superiores a los demás modelos, que realizan predicciones subestimadas. Adicionalmente *Atkinson y Boore* ubica el valor máximo del espectro corrido hacia la derecha respecto a su ubicación real en los tres casos mencionados. Para la estación T08A, a excepción de *Abrahamson et al.* que

excede la observación, los modelos logran desempeños similares pero en un rango de periodos menor al de este estudio. En la estación HTIS, las aceleraciones reportadas por todos son similares al registro.

El espectro de la estación CONC del terremoto de Maule 2010 constituye un caso especial de forma de espectro con dos puntas y claro comportamiento no lineal. Han existido esfuerzos de diverso tipo para intentar comprender y reproducir esta forma espectral [RS08], que fue responsable de grandes pérdidas materiales y humanas en la ciudad de Concepción durante el terremoto del 27 de febrero de 2010. Los resultados de *Abrahamson et al.* y *Contreras y Boroshek* logran reproducir una envolvente de la primera punta del espectro, subestimando la parte más destructiva en torno a los 1.5 [s]. *Atkinson y Boore* entrega un resultado similar pero de menor amplitud. A través del estudio empírico de factores de amplificación dinámica de suelos desarrollado en el capítulo 5, el espectro reportado por este estudio logra reproducir con algunas limitaciones las dos puntas propias de grandes terremotos observados en sitios de periodo predominante largo y alta impedancia, asociada a bajos V_{S30} . La primera punta es fija para todo tipo de suelo, al igual que los espectros de los otros estudios mostrados, e indica el contenido de aceleraciones promedio de un terremoto cualquiera, variando su ubicación y amplitud máxima en función de la magnitud del terremoto y la distancia a la fuente sísmica. La segunda es móvil y varía tanto su ubicación como su amplitud relativa a la primera en función de las características del suelo, indicadas por T^* y V_{S30} respectivamente. Sin embargo, a pesar de reproducir de forma simple las dos puntas, la ubicación de la segunda asociada a las características del suelo en 0.75 [s] contrasta con el valor observado en 1.5 [s]. Esta limitación es propia de los factores empíricos de amplificación dinámica utilizados, que han sido desarrollados únicamente para comportamiento lineal. Una situación abiertamente no lineal como CONC durante el terremoto del Maule 2010 implicaría una flexibilización del periodo predominante T^* del suelo, acompañada de una disminución de su amplitud. Por lo tanto los resultados actuales tienen la potencialidad de reproducir de mejor forma que estudios anteriores la forma y amplitud del destructivo espectro de dos puntas a partir de nuevas investigaciones que incorporen la no linealidad a la determinación de los factores de amplificación del suelo. Respecto a los terremotos interplaca en general, los espectros de este estudio ajustan mejor que estudios anteriores los datos de espectros en diferentes y variadas situaciones. Esto es posible en gran parte a la mayor flexibilidad que entrega el modelo simple de amplificación dinámica para reproducir diferentes situaciones sólo a través de dos parámetros básicos: el periodo predominante T^* y la velocidad de onda de corte promedio a 30 metros de profundidad V_{S30} .

La Figura (6.17) muestra una evaluación similar de las curvas de atenuación espectrales para los terremotos intraplaca de Tarapacá 2005 $M_w = 7.8$ y $H = 105.5$ [km], registrado en la estación ACO, y el terremoto intraplaca de Punitaqui 1997 $M_w = 7.1$ y $H = 62.3$ [km], registrado en la estación ILLA. Para la estación ACO, *Abrahamson et al.* reporta aceleraciones sobreestimadas para periodos bajos y *Atkinson y Boore* subestimadas para periodos intermedios y largos, siendo este estudio la mejor opción. En el caso de la estación ILLA, el mejor ajuste del espectro registrado lo reporta *Abrahamson et al.*, con las aceleraciones de este estudio estando levemente por debajo para periodos cortos. *Atkinson y Boore* proyectan los menores valores nuevamente, subestimando las amplitudes reales de aceleraciones de ambos terremotos.

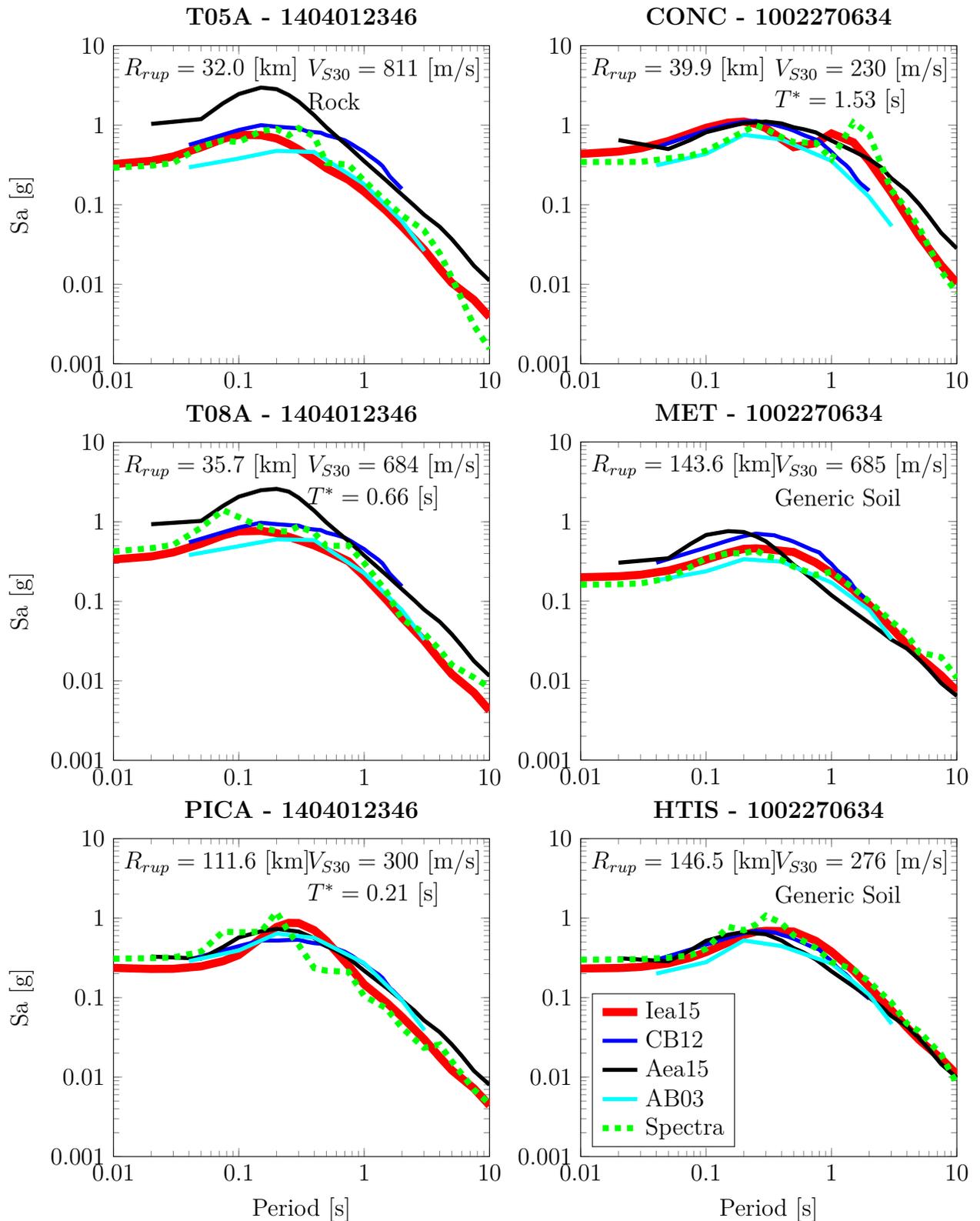


Figura 6.16: Comparación de diferentes predicciones de aceleraciones espectrales para los terremotos **interplaca** Iquique 2014 y Maule 2014 considerando diferentes tipos de suelo y distancias.

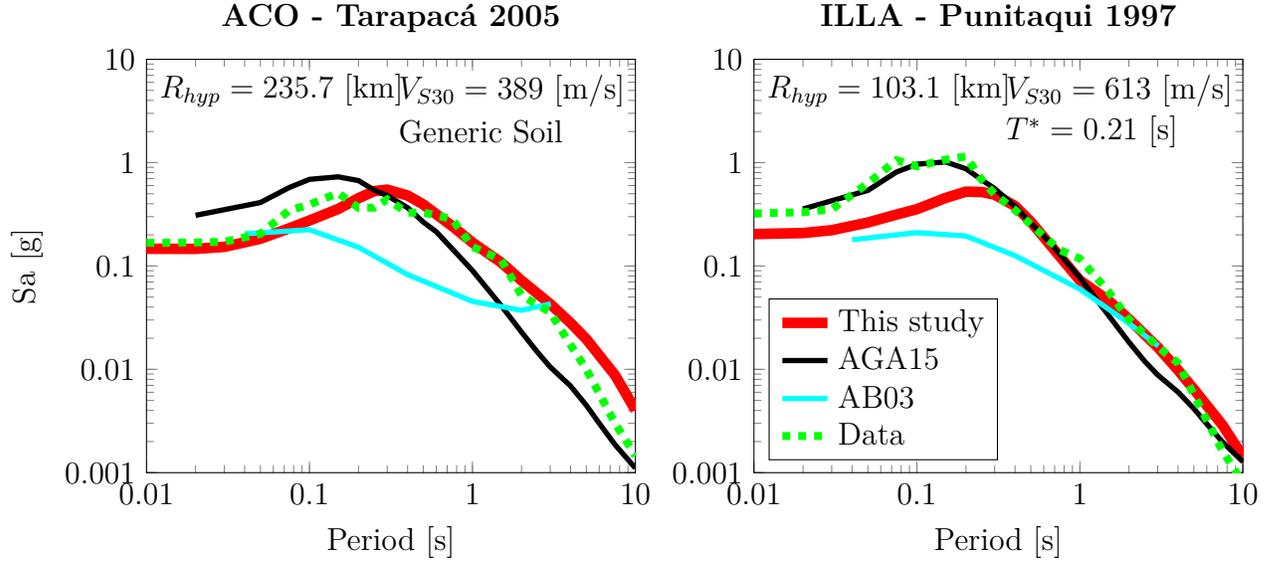


Figura 6.17: Comparación de diferentes predicciones de aceleraciones espectrales para los terremotos **intraplaca** Tarapacá 2005 y Punitaqui 1997 considerando diferentes tipos de suelo y distancias.

6.4.2. Evaluación del desplazamiento

El procesamiento de registros de aceleraciones realizado en el capítulo 3 permite obtener valores de desplazamientos relativos a partir de los valores de aceleración utilizando la fórmula de pseudo espectro

$$PS_d = \frac{PS_a T^2}{4\pi^2} \quad (6.18)$$

donde T corresponde al periodo del oscilador. Esto es posible ya que se ha eliminado el ruido de baja frecuencia de forma conservadora a través de la aplicación de un filtro pasa alto, asegurando no perder demasiada amplitud de señal que alterase el desplazamiento real de los osciladores ante el movimiento superficial. La Figura (6.18) muestra a su izquierda curvas de atenuación de desplazamiento para diferentes magnitudes considerando un oscilador de 0.5 [s] de periodo fundamental. La parte derecha de la Figura (6.18) muestra un espectro de respuesta de desplazamiento para diferentes distancias a la fuente de un evento interplaca $M_w = 8.8$. Este procedimiento de evaluación de desplazamientos se puede aplicar para cualquier aceleración obtenida a través del modelo predictivo desarrollado en este estudio.

Considerando la baja velocidad de decaimiento del movimiento superficial con la distancia para osciladores de periodo largo reportada con anterioridad, la Figura (6.18) muestra disminuciones leves del desplazamiento relativo máximo para periodos superiores a 4 [s] cuando el sitio se encuentra a 50 [km] o a 200 [km] de la fuente sísmica en un terremoto interplaca de magnitud importante. Dicha variación es mayor para osciladores de alta frecuencia, de los 0.05 [s] a los 0.5 [s]. Para periodos menores a 0.03 [s], incluso estando muy cerca de la fuente, se proyectan desplazamientos menores a un décimo de milímetro. Por otro lado, osciladores de periodos mayores a 5 [s] pueden superar los 10 [cm] de desplazamiento relativo en sitios cercanos a la fuente.

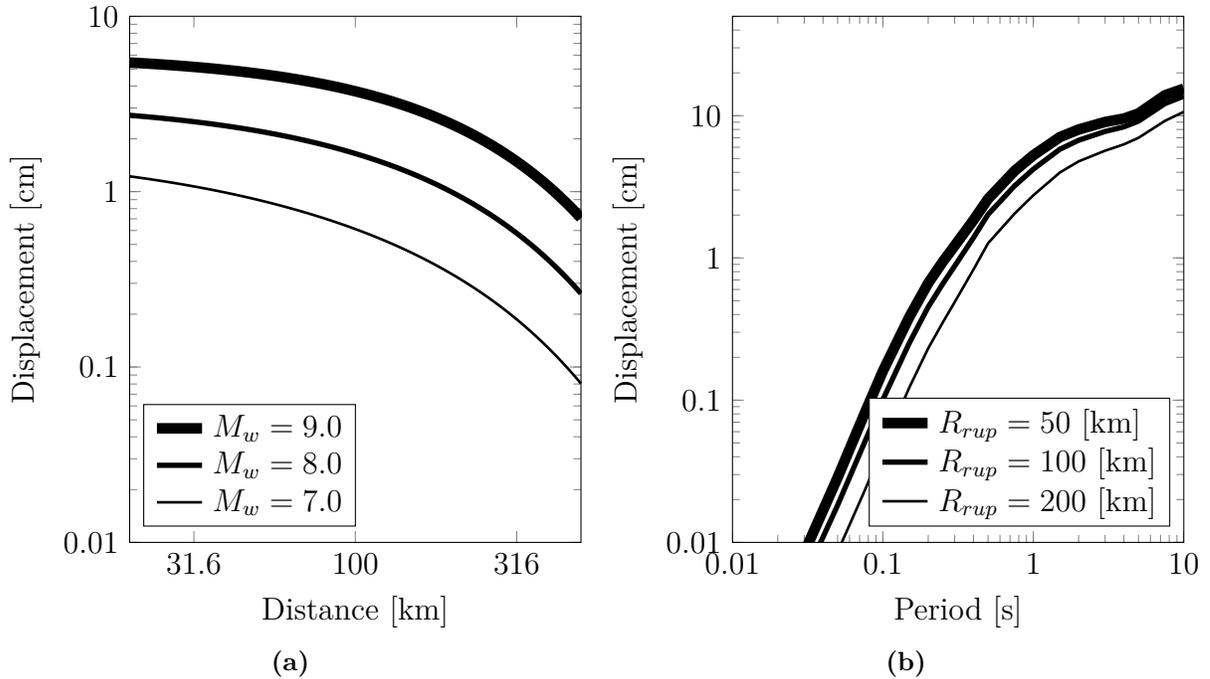


Figura 6.18: (a) Curvas de atenuación de desplazamientos para eventos interplaca de diferentes magnitudes, considerando la respuesta de un oscilador de 0.75 [s] de periodo fundamental y 5% de amortiguamiento. (b) Pseudo espectros de respuesta de desplazamiento para diferentes distancias a la fuente sísmica de un evento interplaca $M_w = 8.8$. En ambos casos se considera un sitio tipo roca.

6.4.3. Consideraciones respecto a la determinación del peligro sísmico en zonas de subducción

Los autores *Stewart et al.* [SDJ⁺15] plantean una discusión al intentar proponer tres modelos de atenuación para la determinación del peligro sísmico en zonas de subducción a nivel global. En ella establecen una serie de criterios que justifican la elección de los trabajos de *Abrahamson et al.*, *Zhao et al.* y *Atkinson y Boore*, los cuales han sido utilizados al evaluar los resultados de este estudio. En el trabajo de *Stewart et al.*, el punto de debate se establece respecto a la inclusión del modelo de *Atkinson y Boore* dentro de la selección, por la forma plana de atenuación que reporta para terremotos interplaca, que es considerada como poco realista por una parte de los integrantes del grupo. En relación a este punto, los resultados obtenidos en este estudio se encuentran en una posición intermedia entre aquel argumento y la necesidad de contar con varios modelos de diferente forma que reproduzcan la incerteza epistémica de los modelos de estimación de intensidades de movimiento de suelo. Por un lado se confirma la forma más plana de la pendiente de atenuación de los terremotos interplaca Sudamericanos, generados entre la zona central de la cordillera de los Andes y la fosa oceánica Chile-Perú, descrita por este modelo y en parte por *Atkinson y Boore*, respecto a la más inclinada de los terremotos interplaca cercanos a Japón y descrita por los modelos de *Zhao et al.* y *Abrahamson et al.*. La forma de la función F_D definida por la ecuación (6.3), que contiene la determinación de la pendiente de la atenuación, tiene una estructura similar a la utilizada por *Abrahamson et al.*, por lo que se ve descartada la posibilidad que el funcional

utilizado sea el generador de la forma plana en la atenuación de los terremotos Sudamericanos. Sin embargo, por otro, la pendiente de la atenuación de este estudio resulta más inclinada que la reportada por *Boore y Atkinson*, corrigiendo las formas casi completamente horizontales vistas la Figura (6.14).

La capacidad de obtener datos de movimientos superficiales es reciente respecto al desarrollo de la actividad sísmica, lo que significa que cada región posee pocos datos que no alcanzan a describir la mayoría de los terremotos de posible ocurrencia. Esto conduce a la paradoja siguiente, donde si bien un modelo determinado únicamente de una sola región puede potencialmente captar las características propias de ella, éste puede llegar a ser insuficientes para describir fenómenos más generales. De esta forma los modelos obtenidos a partir de datos globales permiten reproducir mejor la forma en que, por ejemplo, escala la magnitud con la aceleración para terremotos de grandes magnitudes en regiones donde existen pocos registros. Sin embargo, ante situaciones donde los rangos para los cuales se posee información son similares, un modelo regional específico tendrá mucho mayor éxito a la hora de evaluar el peligro sísmico de la región desde la cual provienen los datos que un modelo global [DSKR09, KA13]. Así, para los rangos de variables $M_w = 5.5 - 9.0$ y $R_{rup} = 30 - 400$ [km], los resultados de este estudio predicen mejor que estudios anteriores las características específicas de los terremotos interplaca de la zona de subducción Sudamericana que va desde el sur de Perú hasta el sur de Chile, incluyendo los modelos globales. Similares observaciones son válidas en un grado menor respecto a los resultados obtenidos para terremotos intraplaca en los rangos de variables predictivas $M_w = 5.5 - 8.0$, $R_{hip} = 55 - 400$ [km] y $H = 55 - 150$ [km].

Para el cálculo del peligro sísmico en cualquier región es deseable poder reproducir la incerteza epistémica de los eventos sísmicos descrita anteriormente. Para ello se utilizan variados modelos de atenuación con diferentes formas físicamente realistas. El mejor de los casos se utilizarán modelos que describan los diferentes comportamientos de terremotos posibles, registrados incluso en otras regiones del mundo. De esta forma, los resultados de este estudio se pueden utilizar en la determinación del peligro sísmico el territorio cercano a la placa Nazca, en regiones de características sismológicas, geológicas y geotécnicas similares y también como método de introducción de incerteza epistémica en cualquier región de subducción del mundo. En este sentido, los resultados de este estudio cuentan con la ventaja de incluir datos recientes de terremotos interplaca de magnitudes M_w 8.8, 8.4 y 8.2 desde 2010 a 2015, registrados en diferentes tipos de suelo y distancias a la fuente sísmica.

6.5. Conclusiones

Para las características específicas de la zona de subducción chilena, se generan curvas de atenuación de PGA y aceleraciones horizontales espectrales máximas para terremotos intraplaca e interplaca. Éstas permiten estimar las aceleraciones máximas horizontales del suelo y de osciladores de un grado de libertad con periodos que van desde 0.01 [s] hasta 10 [s], considerando un 5% de amortiguamiento. Para la medición del tamaño del terremoto se utiliza la magnitud momento M_w , para la localización del sitio respecto a la fuente sísmica la distancia hipocentral R_{hip} en el caso de terremotos intraplaca y la distancia más cercana

al área de ruptura R_{rup} en el caso de grandes terremotos interplaca. Las características del suelo se pueden considerar como tipo roca, donde no existe amplificación de ningún tipo o suelos con amplificación. Para este último caso se utilizan factores empíricos de amplificación dinámica determinados en función del periodo predominante T^* y la velocidad de onda de corte promedio a 30 metros de profundidad V_{S30} . El periodo predominante describe la forma de la amplificación, mientras que el V_{S30} el nivel de amplificación que esta alcanza. La ecuación final utilizada para realizar las estimaciones de aceleraciones es

$$\begin{aligned} \log Y = & c_1 + c_2 M_w + c_9 M_w^2 (1 - F_{eve}) + c_8 (H - h_o) F_{eve} + \Delta c_1 F_{eve} + \Delta c_2 M_w F_{eve} \\ & + (c_3 + c_4 [M_w - M_h] + \Delta c_3 F_{eve}) \log(R + R_o) + c_5 R \\ & + s(T^*) \log\left(\frac{V_{S30}}{V_{ref}}\right) \end{aligned} \quad (6.19)$$

con

$$R_o = (1 - F_{eve}) c_6 \cdot 10^{c_7 [M_w - M_r]} \quad (6.20)$$

donde Y corresponde a la aceleración horizontal máxima del suelo [g] o al valor del espectro de respuesta de aceleraciones de un oscilador con 5% de amortiguamiento [g]. F_{eve} corresponde a un término que indica el tipo de terremoto, considerado como 0 para terremotos interplaca y 1 para terremotos intraplaca y H a la profundidad focal, con $h_o = 50$. Los parámetros M_r , M_h , c_4 , c_6 , c_7 son constantes para cada periodo T del oscilador y se indican en las Tablas (6.3) y (6.2). Los coeficientes c_1 , c_2 , c_9 , c_8 , Δc_1 , c_3 , Δc_3 y c_5 se determinan mediante regresión para cada valor de T y se muestran en las Tablas (6.6) y (6.7). El factor s está asociado al tipo de suelo según su periodo predominante T^* y se determina a partir de la Tabla (6.4). El parámetro V_{ref} corresponde a una velocidad de onda de corte de referencia para determinar la amplitud de la amplificación dinámica y equivale a 1530 [m/s].

Dadas las características del estudio de factores empíricos de amplificación dinámica, la ecuación (6.19) permite reproducir una diversidad más amplia de formas espectrales que estudios anteriores, llegando incluso a generar espectros con dos puntas como el visto durante el terremoto del Maule 2010 en la ciudad de Concepción.

Al comparar los resultados obtenidos con otros estudios similares de terremotos interplaca, se logran ajustes superiores a estudios anteriores para datos de registros de aceleraciones de grandes terremotos. Adicionalmente se logran determinar aceleraciones en un rango de periodos muy superior a otros estudios de curvas de atenuación para la región. En el caso de los terremotos intraplaca, estos son los primeros resultados de curvas de atenuación espectrales de la región, que al ser comparados con estudios obtenidos en base a terremotos intraplaca de otras zonas de subducción del mundo, consiguen mejores ajustes a los espectros de respuesta de aceleración de terremotos chilenos observados.

Los resultados obtenidos pueden ser utilizados en la determinación del peligro sísmico asociado a terremotos interplaca e intraplaca en la zona de subducción chilena de la placa Nazca o en otras regiones de características sismogénicas y geotécnicas similares. Al mismo tiempo que en reportes de movimientos superficiales estimados a partir de escenarios probables o reales utilizando el software SHAKEMap. Los rangos de utilización recomendados para las variables predictivas son $M_w = 5.5 - 9.0$ y $R_{rup} = 30 - 400$ [km] para terremotos interplaca, mientras que $M_w = 5.5 - 8.0$, $R_{hip} = 55 - 400$ [km] y $H = 55 - 150$ [km] para terremotos

intraplaca. Los tipos de suelo pueden ser de tipo roca dura o suelos con periodos predominantes $T^* = 0.1 - 1.2$ [s] y $V_{S30} \geq 230$ [m/s], donde alternativamente se puede considerar un tipo de suelo genérico.

Capítulo 7

Conclusiones y recomendaciones

En el presente trabajo se realiza un estudio empírico compuesto de diferentes etapas consecutivas, cuyo objetivo final es lograr desarrollar un modelo GMPE que permita predecir la intensidad del movimiento superficial generado por terremotos de tipo interplaca o intraplaca dentro de la zona de subducción chilena. A partir de los datos disponibles de registros de aceleraciones entregados por el CSN y RENADIC, estudios anteriores sobre modelos de atenuación tanto para Chile como otras regiones, recomendaciones realizadas por diferentes equipos de expertos internacionales, como el GEM - PEER [ABA⁺12] y el proyecto NGA [PCA⁺08], y una utilización de la sismología aplicada a la ingeniería sísmica, se desarrollan pequeñas subinvestigaciones con sus propios resultados y futuras proyecciones, que logradas de forma consecutiva, permiten obtener el resultado final.

En el capítulo 3 se compilan todos los registros de aceleraciones de terremotos chilenos disponibles con $M_w \geq 5.5$ en una sola gran base de datos, incluyendo un catálogo para estaciones y otro para eventos¹. Además de la magnitud mínima, como criterio de selección se consideran únicamente registros que posean sus dos componentes horizontales más la vertical, que el evento al que están asociados tenga el momento sísmico calculado por alguna agencia dentro de las consultadas (ISC, CSN, USGS), y que el mecanismo sismogénico del evento sea interplaca o intraplaca. Los eventos seleccionados pueden verse en la Tabla (A.1), asociados a las estaciones sísmicas de la Tabla (A.2).

Adicionalmente, se aplican nuevas consideraciones respecto al procesamiento de señales de registros de movimiento desarrolladas por *Boore et al.* [BB05, Boo05, DB11, BG14] y *Akkar et al.* [AB06, AB09, AKYB11]. En vez de aplicar un único filtro pasa banda en valores de corte fijos, se aplica un análisis caso a caso para cada registro, lo que permite extraer valores del espectro de respuesta de aceleraciones y el pseudo espectro de desplazamientos para osciladores de 5 % de amortiguamiento desde los 0.1 [Hz] hasta los 100 [Hz] (periodos de oscilación desde 0.01 [s] hasta 10 [s]). El resultado de esta etapa es una base de datos con eventos interplaca de magnitudes $M_w = 5.5 - 8.8$ y de distancias que van desde los 30 [km] hasta los 400 [km] aproximadamente. Sus mayores vacíos de información se encuentran en los rangos $M_w = 8.4 - 8.8$ y $M_w = 7.1 - 7.6$. Para eventos intraplaca, las magnitudes van

¹Ésta se encuentra disponible a través de comunicación personal con el autor. bidini@ing.uchile.cl

entre $M_w = 5.5 - 7.8$, existiendo sólo dos eventos $M_w \geq 7.0$, Punitaqui 1996 y Tarapacá 2005, mientras que las distancias van desde los 60 [km] hasta los 400 [km]. Para este tipo de eventos no se consideran sismos de profundidad mayor a 160 [km] aproximadamente.

En el capítulo 4 se proponen modelos de fuente extendida para los mayores terremotos interplaca chilenos registrados. Se comprueba que estos permiten calcular una distancia entre el sitio y el punto de generación de las ondas de mayor amplitud más certera que la definida al hipocentro. Sin embargo, debido a que la liberación de energía para megaterremotos interplaca no es homogénea dentro de toda el área de ruptura, se siguen obteniendo importantes errores al calcular la distancia fuente-sitio, sobre todo para estaciones sísmicas más cercanas a la fuente sísmica. Se definen áreas de asperezas aproximadas en función de las zonas donde se concentran los mayores deslizamientos para los mismos eventos. A partir de ellas, se formula una hipótesis respecto a que la distancia más cercana a estas áreas de aspereza permite solucionar en parte ciertas limitaciones de los modelos de ruptura finita más extensos.

En el capítulo 5 se deriva un modelo empírico de factores de amplificación dinámica para los valores del espectro de respuesta de aceleraciones de osciladores de un grado de libertad con 5% de amortiguamiento. Como parámetros de entrada utiliza dos indicadores dinámicos del suelo, identificables a partir de un estudio de razones H/V de registros de aceleraciones de terremotos: el periodo predominante T^* y un factor propuesto n . Siguiendo el procedimiento de *Di Alessandro et al.* [ABB⁺12], T^* puede determinarse como el valor de periodo donde la razón espectral H/V alcanza su máximo. Para las rocas rígidas que poseen razones espectrales H/V de forma plana, no se puede determinar T^* , al igual que para suelos genéricos de más de un valor máximo o de formas tipo sombrero que implican amplificación dinámica en banda ancha. Dependiendo del valor de T^* , o de si la razón espectral indica una roca rígida o un suelo genérico, se selecciona un factor espectral de forma para la amplificación dinámica. Luego, utilizando el factor propuesto n , que corresponde a una modificación a la clasificación de razones espectrales H/V desarrollada por *Pastén* [Pas07], se ajusta el nivel de amplificación, que según se demuestra empíricamente en este capítulo, se relaciona directamente con la amplitud máxima de las razones espectrales H/V. Los resultados del modelo corresponden a factores de amplificación espectrales para el rango de periodos que van desde 0.01 [s] hasta 10 [s], incluyendo PGA, y pueden ser utilizados en diferentes estudios de ingeniería sísmica, incluyendo el peligro sísmico y la generación de modelos de atenuación o GMPE. Su aplicación funciona a través de la multiplicación directa sobre el valor de PGA o respuesta de aceleración espectral medida o predicha sobre un afloramiento rocoso de la forma $Y = Y_o \mu_o^n$, donde Y_o representa la aceleración del afloramiento, μ los factores espectrales de forma de la amplificación de la Tabla (5.6) y n los valores de la Tabla (5.5).

Considerando que en diferentes estudios de ingeniería sísmica se utiliza el indicador V_{S30} como medición de la capacidad de amplificación dinámica de un suelo [Ins], se estudia la relación de su valor con n para las estaciones sísmicas que cuentan con ambos valores determinados. A través de un modelo similar al utilizado por *Choi y Stewart* [CS05], se encuentra una correlación directa entre ambos. De esta forma se concluye que el modelo empírico generado permite evaluar la amplificación dinámica a partir de dos indicadores que simulan el comportamiento de las dos propiedades dinámicas que controlan la amplificación. Mientras T^* permite estimar el valor del periodo fundamental de vibrar del suelo T_o , V_{S30} corresponde a un indicador de la razón de impedancia Δ . De esta forma el comportamiento del mode-

lo derivado asume una forma similar al de una función de transferencia teórica, donde T^* controla la forma de la amplificación y V_{S30} o n su amplitud.

En virtud de estas observaciones, se analiza el comportamiento de los espectros de diseño propuestos por la Norma Chilena Oficial de diseño sísmico de edificios NCh433.Of1996 modificada en 2012 [Ins], detectando algunas diferencias entre ambas. La norma reproduce una relación contraria a la mostrada en este estudio, proponiendo mayores valores de aceleraciones para PGA y alta frecuencia en suelos de periodo largo que en suelos rígidos de periodo corto. Por otro lado la norma genera una tendencia que relaciona de manera directa el nivel de la amplificación dinámica con el aumento del periodo fundamental, relación que según los resultados de este estudio, no necesariamente existiría.

En el capítulo 6 se detalla el procedimiento utilizado para realizar las regresiones que definen el modelo GMPE, al mismo tiempo que se evalúan y analizan sus resultados. En primera instancia se define el subconjunto de la base de datos utilizado en la derivación del modelo, realizando importantes cortes según distancia máxima para datos de eventos de pequeñas magnitudes. En base a un análisis de los modelos de atenuación más utilizados en zonas de subducción [AB03a, ZZA⁺06, AGA15], se explican la forma matemática de la ecuación (6.19) del modelo utilizado, que posteriormente es modificado para ajustar mejor los residuos obtenidos. Los coeficientes finales se muestran en las Tablas (6.4), (6.6) y (6.7).

El modelo obtenido es válido para sismos interplaca de magnitudes $M_w = 5.5 - 9.0$ de distancias más cercanas al área de ruptura $R_{rup} = 30 - 400$ [km], y sismos intraplaca de magnitudes $M_w = 5.5 - 7.8$ de distancias hipocentrales $R_{hip} = 60 - 400$ [km] y profundidades al foco $H = 60 - 150$ [km]. Permite predecir valores máximos de aceleración y desplazamiento en la superficie del suelo, como también la respuesta espectral de aceleraciones y desplazamientos de osciladores de 5% de amortiguamiento con periodos desde 0.01 [s] hasta 10 [s]. Permite incorporar los efectos de amplificación dinámica de una amplia variedad de suelos, con valores de $V_{S30} = 220 - 1500$ [m/s] y de $T^* = 0.15 - 1$ [s]. Dentro de los efectos observados por estudios de atenuación de otras regiones [ABA⁺12, SDJ⁺15], considera la saturación en función de M_w , el cambio de la pendiente de la atenuación según M_w , la saturación cercana a la fuente sísmica, un término de atenuación anelástica, diferentes pendientes de atenuación para sismos interplaca e intraplaca [YCSH97] y una variación de la intensidad respecto a H para eventos intraplaca [AGA15]. Los resultados además permiten confirmar la observación de *Stewart et al.* [SDJ⁺15], reconociendo una diferencia entre las formas de la atenuación de megaterremotos de tipo chileno con la atenuación descrita por GMPEs derivadas a partir de datos de terremotos de Japón [ZZA⁺06].

La utilización conjunta del modelo de atenuación derivado en este capítulo, con los resultados obtenidos en el capítulo anterior, permiten acercarse a reproducir formas espectrales de dos puntas, donde una de ellas corresponde a valores de periodo largo [RS08]. Este tipo de espectro ha sido observado en sitios cercanos a la ciudad de Concepción durante el terremoto del Maule 2010 y siguen siendo motivo de presentes y futuras investigaciones.

7.1. Recomendaciones para desarrollos futuros

Respecto a la base de datos del Capítulo 3:

- (1) La frecuente actividad sísmica de la zona de subducción chilena abre continuas oportunidades para la obtención de datos de movimientos superficiales provocados por terremotos. La incorporación de nuevos eventos interplaca permitiría cubrir los actuales vacíos que posee la base de datos en particular, mientras que en general una mayor cantidad de datos permitirían observar y reconocer fenómenos de la atenuación de los terremotos chilenos que hoy se pierden en la amplia nube de dispersión. La incorporación de nuevos eventos intraplaca por otro lado es urgente. Si bien los actuales resultados permiten realizar estimaciones calibradas con un evento importante como es Tarapacá 2005, otro evento de similares características podría producir importantes modificaciones en los resultados.
- (2) Todavía se puede mejorar el procesamiento de las señales originales. Para la elección del periodo de corte de baja frecuencia, se ha utilizado un valor conservador fijo según el tipo de instrumento. Un análisis caso a caso según la metodología descrita en este capítulo, que incluye un trabajo detallado de corrección de líneas de base, permitiría ampliar el número de registros que son utilizables hasta los 10 [s], generando resultados más robustos para osciladores de periodo largo.
- (3) En función de la capacidad de un suelo de filtrar contenido de frecuencias altas y siguiendo las investigaciones de *Boore et al.* [DB11, BG14], es posible definir un indicador de las características del suelo similar a k_o para los sitios de estaciones sísmicas chilenas. Dentro de sus diferentes aplicaciones, este permitiría anticipar según las capacidades de un sensor específico, si es posible registrar el contenido de alta frecuencia de un terremoto en el caso que éste ocurra cercano al sitio sin perder contenido importante debido al filtro *anti aliasing* (pasa bajo de alto decaimiento) que aplican la mayoría de instrumentos digitales.
- (4) El programa de compilación, procesamiento y exportación de datos se encuentra escrito en base a objetos dentro del lenguaje MATLAB. Su conversión a un lenguaje como C++ o Python, acompañada de técnicas básicas de diseño de *software* permitiría implementar una herramienta web para la consulta y adquisición de datos originales y procesados de registros de aceleraciones.

Respecto a los modelos de fuente sísmica del Capítulo 4:

- (1) Ya que sólo se calculan modelos de fuente sísmica extendida para los terremotos chilenos registrados de mayores magnitudes, queda pendiente evaluar el efecto de introducir estimaciones del área de ruptura a partir de fórmulas empíricas proporcionales a M_w . Es posible que pueda existir alguna variación pequeña para sismos entre $M_w = 7.0 - 7.8$, sin embargo por esta vez se descartó, pues hasta ahora la cantidad de eventos en aquel rango es muy baja.
- (2) Para validar o reemplazar la definición aproximada de fuente sísmica como aspereza de deslizamiento, se pueden realizar estudios de localización de puntos de generación de pulsos de alta frecuencia, en la dirección que sigue *Ruiz et al.* [RKC⁺10]. Estos resultados

pueden servir para evaluar empíricamente las diferencias de localización entre las zonas de mayores deslizamientos en los terremotos chilenos con aquellas de ruptura frágil que generan las grandes amplitudes de ondas de movimiento.

Respecto al modelo de amplificación dinámica de suelos del Capítulo 5:

- (1) Los factores de forma espectral de la amplificación μ_o se calculan de forma discreta según rangos de valores de T^* . A partir de las razones espectrales H/V calculadas en este estudio, se puede intentar derivar un modelo matemático que reproduzca la forma espectral de manera continua respecto a T^* . Para aquella investigación, se deberá considerar el comportamiento anómalo de la amplificación máxima promedio de la clase IV, que se explica hipotéticamente como un sesgo epistémico de la base de datos.
- (2) Estudiar la compatibilidad de los resultados obtenidos en este estudio con las razones espectrales H/V generadas a partir de mediciones de microvibraciones ambientales en los sitios de las estaciones sísmicas utilizadas. Una evaluación favorable permitiría validar el estudio de microvibraciones como una caracterización completa de las capacidades de amplificación dinámica de un suelo. De la misma forma que para μ_o , se puede derivar un modelo matemático que indique la amplitud de los factores de amplificación a partir de una relación continua con el valor máximo de la razón espectral H/V.
- (3) El desarrollo en detalle de la incorporación de la no linealidad al modelo derivado. Los nuevos efectos que deben considerarse son la introducción de una flexibilización de la forma espectral de amplificación (un desplazamiento hacia periodos largos del valor máximo) y una pequeña disminución de la amplitud máxima, siempre y cuando el valor del PGA alcance un valor mínimo de límite no lineal y a si mismo el suelo posea características dinámicas para desarrollarla. Ésta última se puede definir como un valor de V_{S30} que es menor a un valor mínimo establecido o un límite del valor máximo de la razón espectral H/V que es superado.
- (4) Proponer modificaciones a la determinación del espectro lineal elástico de la actual normativa oficial de diseño sísmico, utilizando una forma consistente para representar los efectos del suelo en las intensidades de movimientos superficiales generados por terremotos, incluyendo la posibilidad de comportamiento no lineal.

Respecto a las curvas de atenuación del Capítulo 6:

- (1) La aplicación del modelo GMPE en diversas investigaciones de interés para la ingeniería sísmica. Por ejemplo la generación de curvas de fragilidad calibradas a terremotos del tipo chileno, su incorporación como modulo para el funcionamiento de los mapas de reporte sísmico generados en tiempo real por ShakeMap, la evaluación de peligro sísmico regional, su incorporación como forma de introducir incertidumbre a los análisis de peligro sísmico global o de otras regiones del mundo, etc.
- (2) Evaluación de los efectos que produce en los resultados la utilización de diferentes metodologías de inversión, como por ejemplo inversión bayesiana [AO10].

Bibliografía

- [AB03a] G.M. Atkinson and D.M. Boore. Empirical ground-motion relations for subduction-zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(4):1703–1729, 2003.
- [AB03b] G.M. Atkinson and D.M. Boore. *Erratum to* empirical ground-motion relations for subduction-zone earthquakes and their application to cascadia and other regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(5):2567–2569, 2003.
- [AB06] S. Akkar and J.J. Boomer. Influence of long-period filter cut-off on elastic spectral displacements. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35(9):1145–1165, 2006.
- [AB09] S. Akkar and D.M. Boore. On baseline corrections and uncertainty in response spectra for baseline variations commonly encountered in digital accelerograph records. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(3):1671–1690, 2009.
- [ABA⁺12] C. Di Alessandro, Y. Bozorgnia, N.A. Abrahamson, S. Akkar, and M. Erdik. GEM - PEER global ground motion prediction equations project: An overview. In *15th World Conference on Earthquake Engineering*, 2012.
- [ABB⁺12] C. Di Alessandro, L.F. Bonilla, D.M. Boore, A. Rovelli, and O. Scotti. Predominant-period site classification for response spectra prediction equations in italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(2):680–695, 2012.
- [AGA15] N. Abrahamson, N. Gregor, and K. Addo. BC Hydro Ground Motion Prediction Equations For Subduction Earthquakes. *Earthquake Spectra In-Press*, 2015.
- [AGO⁺10] D. Arroyo, D. García, M. Ordaz, M.A. Mora, and S.K. Singh. Strong ground-motion relations for Mexican interplate earthquakes. *Journal of Seismology*, 14(4):769–785, 2010.
- [AKYB11] S. Akkar, Ö. Kale, E. Yenier, and J.J. Bommer. The high-frequency limit of usable response spectral ordinates from filtered analogue and digital strong-motion accelerograms. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 40(20):1387–1401, 2011.
- [AO10] D. Arroyo and M. Ordaz. Multivariate Bayesian regression analysis applied

- to ground-motion prediction equations, part 1: Theory and synthetic example. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(4):1551–1567, 2010.
- [ASB⁺11] M.C. Arango, F.O. Strasser, J.J. Bommer, R. Boroschek, D. Comte, and H. Tavera. A strong-motion database from the peru-chile subduction zone. *Journal of Seismology*, 15(1):19–41, 2011.
- [BA08] D.M. Boore and G.M. Atkinson. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, 24(1):99–138, 2008.
- [BB05] D.M. Boore and J.J. Boomer. Processing of strong-motion accelerograms: needs, options and consequences. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(2):93–115, 2005.
- [BCKS12] R.L. Boroschek, V. Contreras, D.Y. Kwak, and J.P. Stewart. Strong ground motion attributes of the 2010 mw 8.8 maule, chile, earthquake. *Earthquake Spectra*, 28(1):19–38, 2012.
- [BG14] D.M. Boore and C.A. Goulet. The effect of sampling rate and anti-aliasing filters on high-frequency response spectra. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(1):203–216, 2014.
- [BJ97] D.M. Boore and W.B. Joyner. Site amplifications for generic rock sites. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(2):327–341, 1997.
- [Boo] D.M. Boore.
- [Boo04] D.M. Boore. D. Boore’s Notes on the Response of Causal and Acausal Butterworth Filters, April 2004.
- [Boo05] D.M. Boore. On pads and filters: Processing strong-motion data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(2):745–750, 2005.
- [Boo08] D.M. Boore. Properties of Butterworth Filters as Used in My Record-Processing Software (TSPP), July 2008.
- [BPCS⁺10] M. Béjar-Pizarro, D. Carrizo, A. Socquet, R. Armijo, S. Barrientos, F. Bondoux, S. Bonvalot, J. Campos, D. Comte, J.B. de Chabalier, O. Charade, A. Delorme, G. Gabalda, J. Galetzka, J. Genrich, A. Necessian, M. Olcay, F. Ortega, I. Ortega, D. Remy, J.C. Ruegg, M. Simons, C. Valderas, and C. Vigny. Asperities and barriers on the seismogenic zone in North Chile: state-of-the-art after the 2007 *M*_w 7.7 Tocopilla earthquake inferred by GPS and InSAR data. *Geophysical Journal International*, 183(1):390–406, 2010.
- [Cam97] K.W. Campbell. Empirical Near-Source Attenuation Relationships for Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Pseudo-Absolute Acceleration Response Spectra. *Seismological Research Letters*, 68(1):154–179, 1997.

- [CB12] V. Contreras and R. Boroschek. Strong ground motion attenuation relations for Chilean subduction zone interface earthquakes. In *15th World Conference on Earthquake Engineering*, 2012.
- [CD88] G.L. Choy and J.W. Dewey. Rupture Process of an Extended Earthquake Sequence: Teleseismic Analysis of the Chilean Earthquake of March 3, 1985. *Journal of Geophysical Research*, 93(B2):1103–1118, 1988.
- [CEL⁺86] D. Comte, A. Eisenberg, E. Lorca, M. Pardo, L. Ponce, R. Saragoni, S.K. Singh, and G. Suárez. The 1985 Central Chile earthquake: A repeat of previous great earthquakes in the region? *Science*, 233(4762):449–453, 1986.
- [Cen14] Centro Sismológico Nacional. *Catálogo On-line*. Centro Sismológico Nacional, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2014. <http://www.sismologia.cl>.
- [Con09] V. Contreras. Curvas de atenuación espectrales para sismos chilenos. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Chile, 2009.
- [CR86] D.H. Christensen and L.J. Ruff. Rupture process of the March 3, 1985 Chilean earthquake. *Geophysical Research Letters*, 13:721–724, 1986.
- [Cro91] C.B. Crouse. Ground-motion attenuation equations for earthquakes on the Cascadia subduction zone. *Earthquake Spectra*, 7(2):201–236, 1991.
- [CS05] Y. Choi and J.P. Stewart. Nonlinear site amplification as function of 30 m shear wave velocity. *Earthquake Spectra*, 21(1):1–30, 2005.
- [CSG05] Y. Choi, J.P. Stewart, and R.W. Graves. Empirical model for basin effects accounts for basin depth and source location. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(4):1412–1427, 2005.
- [CVS88] C.B. Crouse, Y.K. Vyas, and B.A. Schell. Ground motions from subduction-zone earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(1):1–25, 1988.
- [DB11] J. Douglas and D.M. Boore. High-frequency filtering of strong-motion records. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(2):395–409, 2011.
- [DBC⁺00] R. Dobry, R.D. Borcherdt, C.B. Crouse, I.M. Idriss, W.B. Joyner, G.R. Martin, M.S. Power, E.E. Rinne, and R.B. Seed. New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions. *Earthquake Spectra*, 16(1):41–67, 2000.
- [DCW81] A.M. Dziewonski, T.-A. Chou, and J.H. Woodhouse. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *Journal of Geophysical Research*, 86:2825–2852, 1981.
- [dIP] Centro de Investigación Periodística. Tsunami paso a paso: los escandalosos errores y omisiones del SHOA y la ONEMI. <http://ciperchile.cl/2012/01/18/tsunami-paso-a-paso-los-escandalosos-errores-y-omisiones-del-shoa-y-la-onemi>

Consultado: 18-10-2015.

- [DMD⁺97] B. Delouis, T. Monfret, L. Dorbath, M. Pardo, L. Rivera, D. Comte, H. Haessler, J.P. Caminade, L. Ponce, E. Kausel, and A. Cisternas. The $m_w = 8.0$ antofagasta (northern chile) earthquake of 30 july 1995: A precursor th the end of the large 1877 gap. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(2):427–445, 1997.
- [DNV10] B. Delouis, J.-M. Nocquet, and M. Vallée. Slip distribution of the February 27, 2010 $M_w = 8.8$ Maule Earthquake, central Chile, from static and high-rate GPS, InSAR, and broadband teleseismic data. *Geophysical Research Letters*, 37(17):1–7, 2010.
- [DPLM09] B. Delouis, M. Pardo, D. Legrand, and T. Monfret. The $m_w = 7.7$ tocopilla earthquake of 14 november 2007 at the south 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, 2009.
- [DSKR09] E. Delavaud, F. Scherbaum, N. Kuehn, and C. Riggelsen. Information-Theoretic Selection of Ground-Motion Prediction Equations fro Seismic Hazard Analysis: An Applicability Study Using Californian Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(6):3248–3263, 2009.
- [END12] G.M. Ekström, M. Nettles, and A.M. Dziewonski. The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200-201:1–9, 2012.
- [EV] E.R. Engdahl and A. Villaseñor. Global seismicity: 1900–1999. In W.H.K. Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, and C. Kisslinger, editors, *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, volume 81A, chapter 41.
- [FBSD07] Y. Fukushima, L.F. Bonilla, O. Scotti, and J. Douglas. Site classification using horizontal-to-vertical response spectral ratios and its impact when deriving empirical ground-motion prediction equations. *Journal of Earthquake Engineering*, 11(5):712–724, 2007.
- [Fuc] Fuchige. Fundación chilena de geotécnia. <http://www.fuchige.cl/descargas-y-links/>. Consultado: 20-08-2015.
- [GSH⁺05] D. García, S.K. Singh, M. Herráiz, M. Ordaz, and J.F. Pacheco. Inslab Earthquakes of Central Mexico: Peak Ground-Motion Parameters and Response Spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(6):2272–2282, 2005.
- [GSWY02] N.J. Gregor, W.J Silva, I.G. Wong, and R.R. Youngs. Ground-motion attenuation relationships for cascadia subduction zone megathrust earthquakes based on a stochastic finite-fault model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(5):1923–1932, 2002.
- [Hay10] G. Hayes. Updated result of the feb 27, 2010 $M_w 8.8$ Maule, Chile earthquake. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2010/>

us2010tfan/finite_fault.php, 2010. Consultado: 14-01-2015.

- [Hay15] G. Hayes. Preliminary Finite Fault Results for the Sep 16, 2015 Mw 8.3 46 km W of Illapel, Chile Earthquake (Version 1). http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20003k7a#scientific_finitefault, 2015. Consultado: 13-10-2015.
- [HHB⁺14] G.P. Hayes, M.W. Herman, W.D. Barnhart, K.P. Furlong, S. Riquelme, H.M. Benz, E. Bergman, S. Barrientos, P.S. Earle, and S. Samsonov. Continuing megathrust earthquake potential in Chile after the 2014 Iquique earthquake. *Nature*, 512(7514):295–298, 2014.
- [Ins] Instituto Nacional de Normalización. *NCh433.Of1966 Modificada en 2012: Diseño Sísmico de Edificios*.
- [Int12] International Seismological Centre. *On-line Bulletin*. Int. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom, 2012. <http://www.isc.ac.uk>.
- [IR97] P.F. Ihmlé and J.-C. Ruegg. Source tomography by simulated annealing using broad-band surface waves and geodetic data: application to the $m_w = 8.1$ Chile 1995 event. *Geophysical Journal International*, 131(1):146–158, 1997.
- [JB81] W. B. Joyner and D. M. Boore. Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 imperial valley, california, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(6):2011–2038, 1981.
- [JB93] W. B. Joyner and D. M. Boore. Methods for regression analysis of strong-motion data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83(2):469–487, 1993.
- [KA13] Ö. Kale and S. Akkar. A New Procedure for Selecting and Ranking Ground-Motion Prediction Equations (GMPEs): The Euclidean Distance-Based Ranking (EDR) Method. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(2A):1069–1084, 2013.
- [KHLS12] K.D. Koper, A.R. Hutko, T. Lay, and O. Sufri. Imaging short-period seismic radiation from the 27 February 2010 Chile (M_W 8.8) earthquake by back-projection of P, PP, and PKIKP waves. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B2), 2012.
- [KN14] A. Kato and S. Nakagawa. Multiple slow-slip events during a foreshock sequence of the 2014 Iquique, Chile M_w 8.1 earthquake. *Geophysical Research Letters*, 41(15):5420–5427, 2014.
- [Kra96] S.L. Kramer. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ 07458, 1996.
- [LL08] P.-S. Lin and C.-T. Lee. Ground-motion attenuation relationships for subduction-zone earthquakes in northeastern taiwan. *Bulletin of the Seismo-*

logical Society of America, 98(1):220–240, 2008.

- [LRA⁺11] S. Lorito, F. Romano, S. Atzori, X. Tong, A. Avallone, J. McCloskey, M. Cocco, E. Boschi, and A. Piatanesi. Limited overlap between the seismic gap and coseismic slip of the great 2010 Chile earthquake. *Nature Geoscience*, 4(3):173–177, 2011.
- [LTS⁺11] K.M. Luttrell, X. Tong, D.T. Sandwell, B.A. Brooks, and M.G. Brevis. Estimates of stress drop and crustal tectonic stress from the 27 February 2010 Maule, Chile, earthquake: Implications for fault strength. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B11), 2011.
- [Mat] Mathworks.
- [MHM94] C. Mendoza, S. Hartzell, and T. Monfret. Wide-band analysis of the 3 march 1985 central chile earthquake: Overall source process and rupture history. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(2):269–283, 1994.
- [MSA⁺10] M. Motagh, B. Schurr, J. Anderssohn, B. Cailleu, T.R. Walter, R. Wang, and J.-P. Villote. Subduction earthquake deformation associated with 14 November 2007, Mw 7.8 Tocopilla earthquake in Chile: Results from InSAR and aftershocks. *Tectonophysics*, 490(1):60–68, 2010.
- [MY95] G.L. Molas and F. Yamazaki. Attenuation of earthquake ground motion in japan including deep focus events. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(5):1343–1358, 1995.
- [MZAS06] G.H. McVerry, J.X. Zhao, N.A. Abrahamson, and P.G. Somerville. New Zealand acceleration response spectrum attenuation relations for crustal and subduction zone earthquakes. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 39(1):1–58, 2006.
- [Nak89] Y. Nakamura. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, 30(1), 1989.
- [Nat15] National Earthquake Information Center. *Catálogo On-line USGS*. National Earthquake Information Center, USGS, Reston VA, USA, 2015. <http://earthquake.usgs.gov/regional/neic>.
- [Pas07] C. Pastén. Respuesta sísmica de la cuenca de Santiago. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención en Ingeniería Geotécnica, Universidad de Chile, Chile, 2007.
- [PCA⁺08] M. Power, B. Chiou, N. Abrahamson, Y. Bozorgnia, T. Shantz, and C. Roblee. An Overview of the NGA Project. *Earthquake Spectra*, 24(1):3–21, 2008.
- [PKHR12] C. Phillips, A.R. Kottke, Y.M.A. Hashash, and E.M. Rathje. Significance of ground motion time step in one dimensional site response analysis. *Soil Dynamics*

and *Earthquake Engineering*, 43:202–217, 2012.

- [PMB⁺10] S. Peyrat, R. Madariaga, E. Buforn, J. Campos, G. Asch, and J.P. Vilotte. 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, 2010.
- [PSP⁺04] B.C. Papazachos, E.M. Scordilis, D.G. Panagiotopoulos, C.B. Papazachos, and G.F. Karakaisis. Global relations between seismic fault parameters and moment magnitude of earthquakes. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 36(3):1482–1489, 2004.
- [RCA⁺96] J.C. Ruegg, J. Campos, R. Armijo, S. Barrientos, P. Briole, R. Thiele, M. Arancibia, J. Cañuta, T. Duquesnoy, M. Chang, D. Lazo, H. Lyon-Caen, L. Ortlieb, J.C. Rossignol, and L. Serrurier. The m_w antofagasta (north chile) earthquake of july 30, 1995: First results from teleseismic and geodetic data. *Geophysical Research Letters*, 23(9):917–920, 1996.
- [RKC⁺10] S. Ruiz, E. Kausel, J. Campos, G.R. Saragoni, and R. Madariaga. Identification of high frequency pulses from earthquake asperities along chilean subduction zone using strong motion. *Pure and Applied Geophysics*, 168(1-2):125–139, 2010.
- [RMG⁺] S. Ruiz, M. Metois, R. Gradin, E. Rivera, S. Leon, S. Cararo, A. Fuenzalida, M. Vallee, F. Leyton, J. Ruiz, C. Vigny, R. Madariaga, and J. Campos. Intense foreshocks and a slow slip event preceded the 2014 Iquique M_w 8.1 earthquake. *Science*.
- [RS05] S. Ruiz and R.G. Saragoni. Fórmulas de atenuación para la subducción de chile considerando los dos mecanismos de sismogénesis y los efectos del suelo. In *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica IX Jornadas*, Noviembre 2005.
- [RS08] S. Ruiz and R.G. Saragoni. Two peaks response spectra (2prs) for subduction earthquakes considering soil and source effects. In *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, October 2008.
- [SAH⁺14] B. Schurr, G. Asch, S. Hainzl, J. Bedford, A. Hoechner, M. Palo, R. Wang, M. Moreno, M. Bartsch, Y. Zhang, O. Oncken, F. Tilmann, T. Dahm, P. Victor, S. Barrientos, and J.-P. Vilotte. Gradual unlocking of plate boundary controlled initiation of the 2014 Iquique earthquake. *Nature*, 512:299–312, 2014.
- [SAR⁺12] B. Schurr, G. Asch, M. Rosenau, R. Wang, O. Oncken, S. Barrientos, P. Salazar, and J.-P. Vilotte. The 2007 M7.7 Tocopilla northern Chile earthquake sequence: Implications for along-strike and downdip rupture segmentation and megathrust frictional behavior. *Journal of Geophysical Research*, 117(B5):1978–2012, 2012.
- [SB80] A.F. Shakal and D.L. Bernreuter. Empirical analysis of near-source ground motion, Prepared for the U.S. Nuclear Regulatory Commission. Technical Report NUREG/CR-2095, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA,

1980.

- [SDJ⁺15] J.P. Stewart, J. Douglas, M. Javanbarg, Y. Bozorgnia, N.A. Abrahamson, D.M. Boore, K.W. Campbell, E. Delavaud, M. Erdik, and P.J. Stafford. Selection of Ground Motion Prediction Equations for the Global Earthquake Model. *Earthquake Spectra*, 31(1):19–45, 2015.
- [SIG⁺99] P. Somerville, K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y.I. Takao Kagawa, N. Smith, and A. Kowada. Characterizing Crustal Earthquake Slip Models for the Prediction of Strong Ground Motion. *Seismological Research Letters*, 70(1):59–80, 1999.
- [Sla07] A. Sladen. Preliminary result 11/14/2007 (Mw 7.7) , Tocopilla earthquake, Chile. http://www.tectonics.caltech.edu/slip_history/2007_tocopilla/tocopilla.html, 2007. Consultado: 14-01-2015.
- [Sla10] A. Sladen. Preliminary result 02/27/2010 (Mw 8.8), Chile. http://www.tectonics.caltech.edu/slip_history/2010_chile/index.html, 2010. Consultado: 14-01-2015.
- [SLL⁺10] G. Shao, X. Li, Q. Liu, X. Zhao, T. Yano, and C. Ji. Preliminary slip model of the feb 27, 2010 Mw 8.9 Maule, Chile earthquake. http://www.geol.ucsb.edu/faculty/ji/big_earthquakes/2010/02/27/chile_2_27.html, 2010. Consultado: 14-01-2015.
- [SMG⁺13] J.P. Stewart, S. Midorikawa, R.W. Graves, K. Khodaverdi, T. Kishida, H. Miura, Y. Bozorgnia, and K.W. Campbell. Implications of the Mw9.0 Tohoku-Oki Earthquake for Ground Motion Scaling with Source, Path, and Site Parameters. *Earthquake Spectra*, 29(S1):S1–S21, 2013.
- [SPM⁺13] A.A. Skarlatoudis, C.B. Papazachos, B.N. Margaris, C. Ventouzi, I. Kalogeras, and the EGELADOS Group. Ground-motion prediction equations of intermediate-depth earthquakes in the hellenic arc, southern aegean subduction area. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(3):1952–1968, 2013.
- [SSB⁺09] G. Scasserra, J.P. Stewart, P. Bazzurro, G. Lanzo, and F. Mollaioli. A Comparison of NGA Ground-Motion Prediction Equations to Italian Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(5):2961–2978, 2009.
- [Tri72] M.D. Trifunac. A note on correction of strong-motion accelerograms for instrument response. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 62(1):401–409, 1972.
- [TSL⁺10] X. Tong, D. Sandwell, K. Luttrell, B. Brooks, M. Bevis, M. Shimada, J. Foster, R. Smalley Jr., H. Parra, J.C. Báez Soto, M. Blanco, E. Kendrick, J. Genrich, and D.J. Caccamise II. The 2010 Maule, Chile earthquake: Downdip rupture limit revealed by space geodesy. *Geophysical Research Letters*, 37(24), 2010.
- [VSP⁺11] C. Vigny, A. Socquet, S. Peyrat, J.-C. Ruegg, M. Métois, R. Madariaga, S. Mor-

van, M. Lancieri, R. Lacassin, J. Campos, D. Carrizo, M. Bejar-Pizarro, S. Barrientos, R. Armijo, C. Aranda, M.-C. Valderas-Bermejo, I. Ortega, F. Bondoux, S. Baize, H. Lyon-Caen, A. Pavez, J.P. Vilotte, M. Bevis, B. Brooks, R. Smalley, H. Parra, J.-C. Baez, M. Blanco, S. Cimbaro, and E. Kendrick. The 2010 m_w 8.8 maule megathrust earthquake of central chile, monitored by gps. *Science*, 332(6036):1417–1421, 2011.

- [WC94] D.L. Wells and K.J. Coppersmith. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4):974–1002, 1994.
- [YCSH97] R.R. Youngs, S.-J. Chiou, W.J. Silva, and J.R. Humphrey. Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68(1):58–73, 1997.
- [YLR⁺14] H. Yue, T. Lay, L. Rivera, C. An, C. Vigny, X. Tong, and J.C. Báez Soto. Localized fault slip to the trench in the 2010 Maule Chile $M_w = 8.8$ earthquake from joint inversion of high-rate GPS, teleseismic body waves, InSAR, campaign GPS, and tsunami observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(10):7786–7804, 2014.
- [ZIZ⁺04] J.X. Zhao, K. Irikura, J. Zhang, Y. Fukushima, P.G. Somerville, A. Asano, T. Saito, H. Okada, and T. Takahashi. Site classification for strong-motion stations in japan using H/V response spectral ratio. In *13th World Conference on Earthquake Engineering*, August 1-6 2004. Paper No. 1278.
- [ZIZ⁺06] J.X. Zhao, K. Irikura, J. Zhang, Y. Fukushima, P.G. Somerville, A. Asano, Y. Ohno, T. Oouchi, T. Takahashi, and H. Ogawa. An Empirical Site-Classification Method for Strong-Motion Stations in Japan Using H/V Response Spectral Ratio. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3):914–925, 2006.
- [ZZA⁺06] J.X. Zhao, J. Zhang, A. Asano, Y. Ohno, T. Oouchi, T. Takahashi, H. Ogawa, K. Irikura, H.K. Thio, P.G. Somerville, Y. Fukushima, and Y. Fukushima. 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, 2006.

Apéndice A

Información de registros, eventos y estaciones

A.1. Catálogo de eventos

Tabla A.1: Información general de los terremotos asociados a los registros de aceleraciones.

ID	Fecha	Hora [UTC]	Mag. [M_w]	Mec.	Lat. [°]	Lon. [°]	Prof. [km]	Ref. Hip.	Ref. Mec.
0006160755	2000-06-16	07:55	6.4	I	-33.830	-70.100	114.0	CEN	HRV
0008111731	2000-08-11	17:31	5.2	I	-18.181	-70.431	58.5	ISC	HRV
0008181321	2000-08-18	13:21	5.2	I	-19.169	-70.136	46.6	ISC	HRV
0107070938	2001-07-07	09:38	7.6	T	-17.530	-71.930	14.1	CEN	HRV
0108080333	2001-08-09	03:33	5.6	I	-18.221	-69.456	114.1	ISC	HRV
0201141536	2002-01-14	15:36	5.8	T	-18.508	-70.135	5.0	CSN	USGS
0202260832	2002-02-26	08:32	5.4	I	-18.289	-69.722	92.5	ISC	HRV
0203280456	2002-03-28	04:56	6.5	I	-21.698	-68.450	122.0	CSN	USGS
0204011959	2002-04-01	19:59	6.3	I	-29.592	-71.677	67.0	CSN	USGS
0205230023	2002-05-24	00:23	5.5	I	-31.964	-70.963	61.6	ISC	HRV
0205231552	2002-05-23	15:52	5.9	T	-30.780	-71.230	44.0	CEN	HRV
0206181356	2002-06-18	13:56	6.4	T	-30.830	-71.060	54.0	CEN	HRV
0209240357	2002-09-24	03:57	6.2	I	-31.419	-69.158	117.3	CSN	USGS
0211121306	2002-11-12	13:06	5.2	I	-20.118	-68.714	114.0	ISC	HRV
0301060054	2003-01-06	00:54	5.7	I	-33.778	-70.369	112.4	CSN	HRV
0306010252	2003-06-01	02:52	5.5	T	-32.950	-71.969	33.0	USGS	HRV
0306192304	2003-06-19	23:04	5.6	T	-30.658	-71.773	26.1	CSN	HRV
0306201330	2003-06-20	13:30	6.8	T	-30.650	-71.530	32.0	CEN	HRV
0401100725	2004-01-10	07:25	5.6	T	-30.842	-71.711	53.3	ISC	HRV
0404301003	2004-04-30	10:03	5.0	I	-33.549	-70.551	100.7	ISC	HRV
0408250512	2004-08-25	05:12	5.1	I	-20.318	-68.943	93.2	ISC	HRV
0409272258	2004-09-27	22:58	5.5	T	-32.633	-71.688	40.7	ISC	HRV
0412080603	2004-12-08	06:03	5.8	T	-30.848	-71.639	33.2	CSN	USGS
0503180135	2005-03-19	01:35	5.3	I	-20.401	-68.687	109.5	ISC	HRV
0503240354	2005-03-25	03:54	5.1	I	-20.248	-68.892	97.4	ISC	HRV

Tabla A.1: — Continuación.

ID	Fecha	Hora [UTC]	Mag. [M_w]	Mec.	Lat. [°]	Lon. [°]	Prof. [km]	Ref. Hip.	Ref. Mec.
0506132244	2005-06-13	22:44	7.8	I	-20.000	-69.190	105.5	CEN	HRV
0507131206	2005-07-13	12:06	5.7	I	-17.857	-70.212	79.3	ISC	HRV
0508130239	2005-08-14	02:39	5.8	I	-19.742	-69.081	114.6	ISC	HRV
0510171923	2005-10-17	19:23	5.7	I	-17.732	-69.548	123.3	ISC	HRV
0603270523	2006-03-27	05:23	5.2	I	-20.847	-69.525	59.3	ISC	HRV
0604092050	2006-04-09	20:50	5.7	T	-20.467	-70.229	36.2	ISC	HRV
0604301917	2006-04-30	19:17	6.6	T	-27.070	-71.220	12.0	CEN	HRV
0604302140	2006-04-30	21:40	6.5	T	-27.180	-71.050	12.0	CEN	HRV
0610121805	2006-10-12	18:05	6.3	T	-31.260	-71.330	31.0	CEN	HRV
0610150133	2006-10-15	01:33	5.5	T	-30.303	-71.472	47.1	CSN	GCMT
0611201438	2006-11-20	14:38	5.5	T	-17.694	-70.161	41.5	ISC	GCM
0710250835	2007-10-25	08:35	5.6	I	-20.538	-68.683	102.5	ISC	GCM
0711141540	2007-11-14	15:40	7.7	T	-22.321	-69.780	33.6	ISC	GCM
0711151503	2007-11-15	15:03	6.3	T	-22.898	-70.415	31.4	ISC	GCM
0711151506	2007-11-15	15:06	6.8	T	-22.739	-70.077	35.0	ISC	GCM
0711170307	2007-11-17	03:07	5.5	T	-23.010	-70.229	34.5	ISC	GCM
0711180702	2007-11-18	07:02	5.3	I	-18.581	-69.526	98.8	ISC	GCM
0712130723	2007-12-13	07:23	6.2	T	-23.234	-70.528	30.6	ISC	GCM
0712151822	2007-12-15	18:22	5.9	T	-32.693	-71.619	28.9	ISC	GCM
0712160809	2007-12-16	08:09	6.7	I	-22.888	-70.129	57.0	ISC	GCM
0802041701	2008-02-04	17:01	6.3	T	-20.186	-69.948	42.8	ISC	GCM
0803011951	2008-03-01	19:51	5.6	T	-20.315	-69.982	38.8	ISC	GCM
0803242039	2008-03-24	20:39	6.2	I	-20.078	-68.973	120.8	ISC	GCM
0812190936	2008-12-19	09:36	5.7	T	-32.418	-71.724	37.1	ISC	GCM
0902112045	2009-02-11	20:45	5.3	I	-20.253	-68.912	108.9	ISC	ISC
0904160208	2009-04-17	02:08	6.1	T	-19.581	-70.502	28.7	ISC	GCM
0907151521	2009-07-15	15:21	5.2	I	-20.382	-69.146	111.3	ISC	ISC
0911130305	2009-11-13	03:05	6.5	T	-19.469	-70.418	36.0	ISC	GCM
1002270634	2010-02-27	06:34	8.8	T	-36.149	-72.933	28.1	ISC	GCM
1002281125	2010-02-28	11:25	6.2	T	-35.003	-71.596	41.6	ISC	GCM
1003251357	2010-03-25	13:57	6.3	T	-35.992	-72.731	33.8	CSN	USGS
1004021934	2010-04-02	19:34	6.0	T	-36.118	-72.898	29.0	CSN	USGS
1004180149	2010-04-18	01:49	6.0	T	-37.377	-74.018	9.1	CSN	USGS
1005060242	2010-05-06	02:42	6.2	T	-18.316	-70.766	38.9	CSN	USGS
1005251309	2010-05-25	13:09	5.6	T	-37.645	-73.183	47.9	CSN	USGS
1006261901	2010-06-26	19:01	5.5	I	-19.109	-69.626	105.9	CSN	USGS
1007120011	2010-07-12	00:11	6.3	I	-22.354	-68.633	125.3	CSN	USGS
1007140832	2010-07-14	08:32	5.8	T	-38.113	-74.131	26.9	CSN	USGS
1007141505	2010-07-14	15:05	5.5	T	-38.291	-73.868	20.9	CSN	USGS
1009231636	2010-09-23	16:36	5.4	T	-34.972	-71.887	47.7	CSN	USGS
1010220138	2010-10-22	01:38	5.6	T	-29.594	-71.112	44.0	CSN	USGS
1010221931	2010-10-22	19:31	5.8	I	-21.010	-68.806	136.3	CSN	USGS
1010230558	2010-10-23	05:58	5.5	T	-37.791	-74.088	45.5	CSN	USGS
1011061215	2010-11-06	12:15	5.0	I	-18.965	-69.490	105.3	CSN	USGS
1101022020	2011-01-02	20:20	7.2	T	-38.355	-73.326	24.0	USGS	USGS
1101042259	2011-01-04	22:59	5.3	I	-29.175	-69.788	128.0	CSN	USGS

Tabla A.1: — Continuación.

ID	Fecha	Hora [UTC]	Mag. [M_w]	Mec.	Lat. [°]	Lon. [°]	Prof. [km]	Ref. Hip.	Ref. Mec.
1102051611	2011-02-05	16:11	5.8	T	-37.621	-73.448	28.9	USGS	USGS
1102112005	2011-02-11	20:05	6.9	T	-36.422	-73.960	26.0	USGS	USGS
1102130851	2011-02-13	08:51	5.8	T	-36.565	-73.178	20.7	USGS	USGS
1102140340	2011-02-14	03:40	6.7	T	-35.380	-72.834	21.0	USGS	USGS
1102142156	2011-02-14	21:56	5.2	I	-20.031	-69.401	99.0	CSN	USGS
1102282045	2011-02-28	20:45	5.2	I	-20.457	-69.271	101.4	CSN	USGS
1103061231	2011-03-06	12:31	6.3	I	-18.309	-69.440	112.4	CSN	USGS
1104021059	2011-04-02	10:59	5.9	I	-19.684	-69.355	100.5	CSN	USGS
1106201635	2011-06-20	16:35	6.4	I	-21.874	-68.668	128.7	CSN	USGS
1107151455	2011-07-15	14:55	5.4	I	-21.177	-68.781	125.1	CSN	USGS
1107230256	2011-07-23	02:56	5.5	I	-29.318	-70.465	135.7	CSN	USGS
1110221007	2011-10-22	10:07	5.1	I	-18.144	-69.594	123.8	CSN	GCMT
1111050713	2011-11-05	07:13	5.7	T	-23.506	-70.236	43.2	CSN	USGS
1203240728	2012-03-24	07:28	5.1	I	-33.052	-71.063	68.8	CSN	GCMT
1203252237	2012-03-25	22:37	7.1	T	-35.200	-72.217	40.7	CSN	USGS
1204170350	2012-04-17	03:50	6.7	T	-32.787	-71.812	35.0	CSN	USGS
1204300739	2012-04-30	07:39	5.6	T	-29.800	-71.641	43.1	CSN	USGS
1205141000	2012-05-14	10:00	6.2	I	-18.115	-70.237	119.6	CSN	USGS
1205190835	2012-05-19	08:35	5.8	I	-25.741	-70.858	83.6	CSN	USGS
1209211217	2012-09-21	12:17	5.4	I	-19.719	-69.335	100.8	CSN	GCMT
1210080150	2012-10-08	01:50	5.7	I	-21.828	-68.537	121.3	CSN	USGS
1210111722	2012-10-11	17:22	5.5	I	-32.879	-70.651	95.0	CSN	USGS
1211141902	2012-11-14	19:02	6.1	I	-29.237	-71.235	82.3	CSN	USGS
1301091838	2013-01-09	18:38	5.0	I	-18.045	-69.695	111.2	CSN	GCMT
1301132123	2013-01-13	21:23	5.3	I	-20.116	-69.315	89.9	CSN	GCMT
1301302015	2013-01-30	20:15	6.8	I	-28.178	-70.882	52.2	CSN	USGS
1307101432	2013-07-10	14:32	5.6	I	-19.367	-69.522	112.9	CSN	USGS
1308230834	2013-08-23	08:34	5.8	I	-22.278	-68.855	117.5	CSN	USGS
1310312303	2013-10-31	23:03	6.6	I	-30.372	-71.501	52.0	CSN	USGS
1312040539	2013-12-04	05:39	5.2	I	-24.578	-69.295	72.4	CSN	USGS
1401040011	2014-01-04	00:11	5.7	T	-20.687	-70.795	26.1	CSN	USGS
1401070343	2014-01-07	03:43	5.3	I	-20.989	-69.729	97.3	CSN	USGS
1401291001	2014-01-29	10:01	5.6	I	-18.564	-69.597	122.0	CSN	USGS
1402121143	2014-02-12	11:43	5.6	I	-22.354	-68.813	99.9	CSN	USGS
1403170511	2014-03-17	05:11	6.4	T	-19.928	-70.944	28.3	CSN	USGS
1403182126	2014-03-18	21:26	5.8	T	-19.958	-70.944	38.1	CSN	USGS
1403201841	2014-03-20	18:41	5.1	I	-24.032	-69.250	96.5	CSN	USGS
1403241126	2014-03-24	11:26	5.7	T	-19.846	-70.828	40.6	CSN	USGS
1403241140	2014-03-24	11:40	5.6	T	-19.822	-70.868	41.1	CSN	USGS
1403241545	2014-03-24	15:45	5.7	T	-19.594	-70.791	43.0	CSN	USGS
1403311253	2014-03-31	12:53	5.6	I	-19.511	-69.174	114.5	CSN	USGS
1404012346	2014-04-01	23:46	8.2	T	-19.572	-70.908	38.9	GUC	USGS
1404012357	2014-04-01	23:57	6.9	T	-19.916	-71.081	36.6	GUC	USGS
1404020446	2014-04-02	04:46	5.5	T	-20.134	-70.792	38.6	GUC	USGS
1404030158	2014-04-03	01:58	6.5	T	-20.314	-70.583	30.7	GUC	USGS
1404030243	2014-04-03	02:43	7.7	T	-20.517	-70.439	27.7	GUC	USGS

Tabla A.1: — Continuación.

ID	Fecha	Hora [UTC]	Mag. [M_w]	Mec.	Lat. [°]	Lon. [°]	Prof. [km]	Ref. Hip.	Ref. Mec.
1404030526	2014-04-03	05:26	6.4	T	-20.798	-70.651	38.0	GUC	USGS
1404040137	2014-04-04	01:37	6.3	T	-20.616	-70.566	40.2	GUC	USGS
1404040952	2014-04-04	09:52	5.4	I	-31.476	-70.639	106.3	CSN	USGS
1404050222	2014-04-05	02:22	5.6	T	-32.669	-71.295	42.3	CSN	USGS
1404071343	2014-04-07	13:43	5.7	T	-20.131	-70.905	35.6	GUC	USGS
1404081014	2014-04-08	10:14	5.6	T	-20.558	-70.978	38.2	GUC	USGS
1404110001	2014-04-11	00:01	6.2	T	-20.717	-70.649	38.9	GUC	USGS
1404131211	2014-04-13	12:11	5.5	T	-20.585	-70.713	23.6	GUC	USGS
1404192054	2014-04-19	20:54	5.8	T	-19.965	-71.112	40.0	GUC	USGS
1405161708	2014-05-16	17:08	5.5	I	-23.493	-68.859	111.8	GUC	USGS
1405170911	2014-05-17	09:11	5.6	T	-19.989	-70.896	42.6	GUC	USGS
1405301141	2014-05-30	11:41	5.2	I	-21.309	-69.974	67.8	GUC	USGS
1405301532	2014-05-30	15:32	5.6	I	-21.302	-69.999	59.6	GUC	USGS
1406190938	2014-06-19	09:38	5.7	T	-19.931	-70.906	38.8	GUC	USGS
1406191954	2014-06-19	19:54	5.8	T	-19.815	-70.941	40.1	GUC	USGS
1406201953	2014-06-20	19:53	5.6	T	-19.772	-70.942	39.7	GUC	USGS
1406202022	2014-06-20	20:22	5.8	T	-19.744	-71.002	38.2	GUC	USGS
1407130718	2014-07-13	07:18	5.3	I	-30.748	-70.620	83.4	CSN	USGS
1407232139	2014-07-23	21:39	5.5	I	-20.238	-68.740	122.0	GUC	USGS
1408230445	2014-08-23	04:45	5.7	I	-20.189	-69.076	100.3	CSN	USGS
1408232232	2014-08-23	22:32	6.4	T	-32.737	-71.498	40.1	CSN	USGS
1410070509	2014-10-07	05:09	5.5	I	-19.650	-69.470	109.2	CSN	CSN
1502171435	2015-02-17	14:35	5.8	I	-32.380	-70.990	77.5	CSN	CSN
1503230451	2015-03-23	04:51	6.3	I	-18.420	-69.270	121.0	CSN	CSN
1503281636	2015-03-28	16:36	5.8	I	-22.190	-68.700	111.7	CSN	CSN
1504010817	2015-04-01	08:17	5.5	T	-29.350	-71.660	39.6	CSN	CSN
1505290428	2015-05-29	04:28	5.5	T	-28.220	-70.640	42.7	CSN	CSN
1506101352	2015-06-10	13:52	6.0	I	-22.430	-68.580	130.5	CSN	CSN
1508232310	2015-08-23	23:10	6.0	T	-29.720	-71.250	50.1	CSN	CSN
1509011528	2015-09-01	15:28	5.6	I	-19.790	-69.250	97.2	CSN	CSN
1509162254	2015-09-16	22:54	8.3	T	-31.570	-71.654	25.0	USGS	USGS
1509162259	2015-09-16	22:59	7.1	T	-31.620	-71.750	26.7	CSN	CSN
1509162316	2015-09-16	23:16	6.8	T	-31.900	-71.900	29.2	CSN	CSN
1509162318	2015-09-16	23:18	7.6	T	-31.590	-71.790	16.5	CSN	CSN
1509170141	2015-09-17	01:41	6.5	T	-31.110	-71.650	49.5	CSN	CSN
1509170355	2015-09-17	03:55	5.8	T	-31.460	-71.700	53.3	CSN	CSN
1509170410	2015-09-17	04:10	6.6	T	-31.540	-71.750	40.7	CSN	CSN
1509172040	2015-09-17	20:40	5.5	T	-30.040	-71.670	32.7	CSN	CSN
1509190907	2015-09-19	09:07	6.0	T	-31.130	-71.580	34.2	CSN	CSN
1509200302	2015-09-20	03:02	5.5	T	-30.790	-71.320	48.3	CSN	CSN
1509210539	2015-09-21	05:39	6.2	T	-31.760	-71.740	40.7	CSN	CSN
1509211739	2015-09-21	17:39	6.7	T	-31.760	-71.550	13.0	CSN	CSN
1509220712	2015-09-22	07:12	6.2	I	-31.450	-71.130	63.3	CSN	CSN
1509260251	2015-09-26	02:51	6.3	T	-30.790	-71.420	40.3	CSN	CSN
8111111737	1981-11-11	17:37	6.7	I	-32.240	-71.470	56.1	Ruiz, 2002	Ruiz, 2002

Tabla A.1: — Continuación.

ID	Fecha	Hora [UTC]	Mag. [M_w]	Mec.	Lat. [°]	Lon. [°]	Prof. [km]	Ref. Hip.	Ref. Mec.
8503032247	1985-03-03	22:47	8.0	T	-33.139	-71.761	35.0	CEN	PyS
8503032338	1985-03-03	23:38	6.4	T	-32.955	-71.142	17.8	CEN	NEIC
8503040032	1985-03-04	00:32	7.4	T	-33.236	-71.740	40.0	CEN	HRV
8503250514	1985-03-25	05:14	6.5	T	-34.265	-72.173	37.5	CEN	USGS
8504090157	1985-04-09	01:57	7.1	T	-34.116	-71.513	49.4	CEN	PyS
9507300511	1995-07-30	05:11	8.0	T	-23.336	-70.265	40.5	CEN	GS
9602221340	1996-02-22	13:40	6.0	T	-33.588	-71.552	47.3	CEN	GS
9703250014	1997-03-25	00:14	5.5	I	-33.424	-70.565	88.5	ISC	HRV
9710150103	1997-10-15	01:03	7.1	I	-30.891	-71.154	62.3	CEN	GS
9711031917	1997-11-03	19:17	6.2	I	-30.800	-71.260	52.0	Pardo, 2002	Pardo, 2002
9801301216	1998-01-30	12:16	7.0	T	-23.846	-70.149	41.4	CEN	USGS
9810100412	1998-10-10	04:12	5.7	T	-33.440	-71.938	35.6	ISC	HRV
9810291955	1998-10-29	19:55	5.3	I	-32.827	-70.512	94.7	ISC	HRV
9811271027	1998-11-27	10:27	5.5	I	-32.995	-69.342	120.1	ISC	HRV
9812011558	1998-12-01	15:58	5.3	I	-17.593	-69.292	142.7	ISC	HRV
9902051607	1999-02-05	16:07	5.3	I	-34.812	-70.848	103.2	ISC	HRV
9908010106	1999-08-02	01:06	5.5	I	-33.104	-70.197	105.3	ISC	HRV
9911300401	1999-11-30	04:01	6.6	I	-18.917	-69.141	124.6	CEN	GS

A.2. Catálogo de estaciones sísmicas

Tabla A.2: Información general de las estaciones asociadas a los registros de aceleraciones.

#	Código	Estación Referencia	Instrumento	Localización		V_{S30} [m/s]	T^* [s]	Información geotécnica		
				Latitud [°]	Longitud [°]			NCh433.Of1996	Propuesta	Genérico
1	AC04	EPI	–	-28.205	-71.074	–	plano	A*	I ¹	Rock
2	AC05		EPI	-28.836	-70.274	–	0.13	A*	II ²	Soil
3	ACEM	Arica Cementerio	SMA-1 5015	-18.479	-70.308	432	1.05	C	V ⁴	Soil
4	ACHA	Arica Chacalluta	ETNA 2797	-18.315	-70.314	–	banda	F*	VI ^{nc}	Soil
5	ACO	Arica Costanera	SMA-1 5004	-18.471	-70.313	389	banda	C	VI ^{nc}	Soil
6	ACRU	Arica Cerro la Cruz	ETNA 2796	-18.491	-70.311	1132	0.33	A	III ²	Soil
7	ALHO	Alto Hospicio	QDR 673	-20.265	-70.101	–	0.16	B*	II ²	Soil
8	ANGO	Angol Hospital	QDR 760	-37.790	-72.710	315	0.24	D	III ⁴	Soil
9	ANTO	Antofagasta UCN	ETNA 2803	-23.681	-70.411	–	plano	A*	I ¹	Rock
10	ANTU	La Pintana Antumapu	FBA ES-T	-33.569	-70.633	550	0.41	B	IV ⁴	Soil
11	AP01		EPI	-18.371	-70.342	–	banda	F*	VI ^{nc}	Soil
12	ARIC	Arica	ETNA 815	-18.482	-70.313	–	0.29	C*	III ³	Soil
13	C01O		EPI	-29.877	-71.238	–	banda	F*	VI ^{nc}	Soil
14	C07O		EPI	-31.634	-71.168	–	banda	F*	VI ^{nc}	Soil
15	C09O		EPI	-29.511	-71.200	–	0.18	B*	II ³	Soil
16	C11O		EPI	-30.696	-70.959	–	0.34	C*	III ³	Soil
17	C12O		EPI	-31.398	-71.458	–	banda	F*	VI ^{nc}	Soil
18	CALA	Calama Hospital	ETNA 2804	-22.459	-68.930	–	1.63	E*	V ³	Soil
19	CAU	Cauquebes		-36.000	-72.220	388	0.47	C	IV ⁴	Soil
20	CBCH	Cabildo	QDR	-32.427	-71.069	397	banda	C	VI ^{nc}	Soil
21	CCSP	Concepción Colegio San Pedro de la Paz	FBA ES-T	-36.844	-73.109	390	1.35	C	V ³	Soil
22	CHIL	Chillán Viejo		-36.600	-72.100	568	0.35	B	III ²	Soil
23	CO02		EPI	-31.204	-71.000	–	0.62	D*	IV ⁴	Soil
24	CO03		EPI	-30.839	-70.689	–	0.17	B*	II ²	Soil
25	CO04		EPI	-32.043	-70.975	–	0.21	B*	III ³	Soil
26	COLB	Colbún		-35.720	-71.430	–	plano	A*	I ¹	Rock
27	CON85	Constitución 1985		-35.300	-72.320	–	1.01	E*	V ⁴	Soil
28	CONC	Concepción Colegio Inmaculada Concepción	SMA-1	-36.828	-73.048	230	1.53	D	V ⁴	Soil

Tabla A.2: — Continuación.

#	Código	Estación Referencia	Instrumento	Localización		V_{S30} [m/s]	T^* [s]	Información geotécnica		
				Latitud [°]	Longitud [°]			NCh433.Of1996	Propuesta	Genérico
29	CONC2	Concepción Plaza	ETNA 2802	-36.828	-73.048	–	0.76	D	IV ³	Soil
30	CONT	Constitución Hospital	SMA-1 4598	-35.340	-72.400	343	banda	D	VI ^{nc}	Soil
31	COPI	Copiapó Hospital	QDR 672	-27.374	-70.322	–	0.37	D*	III ⁴	Soil
32	CRMA	Maipú Centro de Referencia de Salud	QDR 663	-33.509	-70.771	450	0.53	C	IV ⁴	Soil
33	CSCH	Casablanca Teatro Municipal	QDR	-33.321	-71.411	332	0.63	D	IV ⁴	Soil
34	CURI	Curicó Hospital	QDR 499	-34.991	-71.237	673	0.24	B	III ³	Soil
35	CUY	Cuya	SMA-1 4561	-19.160	-70.180	–	0.21	C*	III ⁴	Soil
36	CVCH	Convento Viejo		-34.768	-71.116	–	0.64	D*	IV ²	Soil
37	DGF	Geofísica Uchile		-33.470	-70.670	–	banda	F*	VI ^{nc}	Soil
38	END	Santiago Endesa		-33.450	-70.670	513	0.97	B	V ²	Soil
39	FAR1	Farellones	CMG-40T	-33.338	-70.299	–	0.17	B*	II ³	Soil
40	FCFM	Civil Uchile		-33.457	-70.662	–	banda	F*	VI ^{nc}	Soil
41	FUBA	Fuerte Baquedano	QDR 674	-20.135	-69.755	–	0.41	D*	IV ²	Soil
42	GO01	Chusmiza	FBA ES-T	-19.669	-69.194	–	0.16	B*	II ⁴	Soil
43	GO02	Mina El Guanaco	FBA ES-T	-25.163	-69.590	–	plano	A*	I ¹	Rock
44	GO03	Copiapó	GBV316	-27.594	-70.235	–	plano	A*	I ¹	Rock
45	GO04	Tololo - Vicuña	FBA ES-T	-30.173	-70.799	–	0.65	D*	IV ⁴	Soil
46	HMBCX	Humberstone	CMG5	-20.278	-69.888	677	plano	B	I ¹	Rock
47	HSOR	Puente Alto Hospital Sótero del Río	QDR 671	-33.578	-70.581	–	0.51	D*	IV ³	Soil
48	HTIS	Peñalolén Hospital Luis Tisné	QDR 670	-33.501	-70.579	276	banda	D	VI ^{nc}	Soil
49	HUA85	Hualañe 1985		-34.970	-71.820	–	0.35	D*	III ³	Soil
50	HUAL	Hualañe Hospital	SMA-1 4564	-34.976	-71.806	560	banda	B	VI ^{nc}	Soil
51	HUAR	Huara	SMA-1 6975	-19.996	-69.767	–	0.25	C*	III ³	Soil
52	ILLA	Illapel	SMA-1 4565	-31.630	-71.170	613	0.21	B	III ³	Soil
53	ILO	Iloca		-34.920	-72.220	555	0.36	B	III ⁴	Soil

Tabla A.2: — Continuación.

#	Código	Estación Referencia	Instrumento	Localización		V_{S30} [m/s]	T^* [s]	Información geotécnica		
				Latitud [°]	Longitud [°]			NCh433.Of1996	Propuesta	Genérico
54	IQEC	Iquique Escuela Chipana	ETNA 6151	-20.252	-70.126	–	0.51	D*	IV ³	Soil
55	IQID	Iquique IDIEM	SMA-1 7051	-20.220	-70.142	–	0.50	D*	IV ²	Soil
56	IQPZ	Iquique Plaza	SMA-1 7050	-20.213	-70.149	–	banda	F*	VI ^{nc}	Soil
57	IQUI	Iquique Hospital	ETNA 2800	-20.214	-70.138	–	0.53	D*	IV ²	Soil
58	ISI	San Isidro		-32.930	-71.280	789	banda	B	VI ^{nc}	Soil
59	LACH	Colegio Las Américas	FBA ES-T	-33.452	-70.531	–	banda	F*	VI ^{nc}	Soil
60	LCO	Las Campanas Observatorio		-29.011	-70.701	620	plano	B	I ¹	Rock
61	LIG	La Ligua		-32.500	-71.230	620	0.45	B	IV ⁴	Soil
62	LLAY	Llay Llay		-32.830	-70.970	613	plano	B	I ¹	Rock
63	LLO	Llolleo	SMA-1 4566	-33.620	-71.600	305	0.42	D	IV ³	Soil
64	LMEL	Las Melosas	FBA ES-T	-33.848	-70.203	–	0.33	C*	III ³	Soil
65	LOA	El Loa	SMA-1 4564	-21.425	-70.057	–	plano	A*	I ¹	Rock
66	LSCH	La Serena	FBA ES-T	-29.908	-71.245	–	0.39	D*	III ³	Soil
67	LSER	La Serena	SMA-1 5016	-29.908	-71.245	–	0.34	C*	III ³	Soil
68	MAR	Viña del Mar Puente Marga Marga	ETNA 1215, QDR, SMA-1	-33.047	-71.510	–	banda	F*	VI ^{nc}	Soil
69	MAT	Matanzas		-33.960	-71.870	380	banda	C	VI ^{nc}	Soil
70	ME03		EPI	-33.494	-70.510	–	banda	F*	VI ^{nc}	Soil
71	ME05		EPI	-33.392	-70.738	–	0.39	D*	III ⁴	Soil
72	MEJI	Mejillones Hospital	ETNA 2794	-23.100	-70.450	–	0.38	D*	III ²	Soil
73	MELP	Melipilla	QDR	-33.680	-71.220	–	0.19	B*	II ⁴	Soil
74	MET	La Florida Metro Línea 5 Estación Mirador	K2 958	-33.514	-70.605	685	banda	B	VI ^{nc}	Soil
75	MICH	Michilla	ETNA 6150	-22.758	-70.281	–	banda	F*	VI ^{nc}	Soil
76	MJCE	Mejillones Central	ETNA 6154	-23.080	-70.410	–	0.48	D*	IV ²	Soil
77	MJPU	Mejillones Puerto	ETNA 6156	-23.078	-70.385	–	plano	A*	I ¹	Rock
78	MNMCX	Miñi Miñi	CMG5	-19.131	-69.596	–	0.17	B*	II ²	Soil
79	MOCH	Los Molles	QDR	-32.232	-71.507	300	0.64	D	IV ⁴	Soil

Tabla A.2: — Continuación.

#	Código	Estación Referencia	Instrumento	Localización		V_{S30} [m/s]	T^* [s]	Información geotécnica		
				Latitud [°]	Longitud [°]			NCh433.Of1996	Propuesta	Genérico
80	MT01	Daracena	EPI	-33.864	-71.251	–	banda	F*	VI ^{nc}	Soil
81	MT05	Cerro Colorado	EPI	-33.392	-70.738	–	0.45	D*	IV ⁴	Soil
82	MT09	Talagante	EPI	-33.776	-70.989	–	plano	A*	I ¹	Rock
83	OLMU	Olmué		-32.994	-71.173	391	banda	C	VI ^{nc}	Soil
84	PAMO	Puente Amolanas	K2 1784	-31.198	-71.611	–	0.24	C*	III ³	Soil
85	PAP	Papudo	SMA-1 5014	-32.520	-71.450	517	0.29	B	III ⁴	Soil
86	PATCX	Punta Patache	CMG5	-20.821	-70.153	–	0.27	C*	III ²	Soil
87	PB01	Huatacondo	FBA ES-T	-21.043	-69.487	–	plano	A*	I ¹	Rock
88	PB03	El Tigre	FBA ES-T	-22.048	-69.753	–	plano	A*	I ¹	Rock
89	PB04	Mantos de La Luna	FBA ES-T	-22.334	-70.149	–	plano	A*	I ¹	Rock
90	PB05	Michilla	FBA ES-T	-22.853	-70.202	–	plano	A*	I ¹	Rock
91	PB06	Pedro de Valdivia	FBA ES-T	-22.706	-69.572	–	plano	A*	I ¹	Rock
92	PB07	Cerro Tatas	FBA ES-T	-21.727	-69.886	–	plano	A*	I ¹	Rock
93	PB08	Macaya	FBA ES-T	-20.141	-69.153	–	plano	A*	I ¹	Rock
94	PB09	Quillagua	FBA ES-T	-21.796	-69.242	–	plano	A*	I ¹	Rock
95	PB10	Juan López	FBA ES-T	-23.513	-70.554	–	plano	A*	I ¹	Rock
96	PB11	Quebrada Aricilda	FBA ES-T	-19.761	-69.656	–	0.65	D*	IV ²	Soil
97	PB12	Arica Cerro Macarana	FBA ES-T	-18.614	-70.328	–	plano	A*	I ¹	Rock
98	PB13		EPI	-18.336	-69.502	–	0.43	D*	IV ³	Soil
99	PB15	Sierra Gorda	FBA ES-T	-23.208	-69.471	–	0.51	D*	IV ³	Soil
100	PB16	Cerro Chapiquiña	FBA ES-T	-18.335	-69.508	–	plano	A*	I ¹	Rock
101	PICA	Pica Hospital	ETNA 2799	-20.492	-69.330	–	0.21	B*	III ³	Soil
102	PICH	Pichilemu	QDR	-34.380	-72.020	623	banda	B	VI ^{nc}	Soil
103	PIS	Pisagua	ETNA 2795, SMA-1 4573	-19.595	-70.211	–	plano	A*	I ¹	Rock
104	POCO	Poconchile	ETNA 2798, SMA-1	-18.453	-70.067	511	banda	B	VI ^{nc}	Soil
105	PPAT	Puerto Patache	CUSP 3A 40021	-20.810	-70.200	–	0.26	C*	III ²	Soil
106	PSGCX	Pisagua	CMG5	-19.599	-70.123	1558	plano	A	I ¹	Rock

Tabla A.2: — Continuación.

#	Código	Estación Referencia	Instrumento	Localización			Información geotécnica			
				Latitud [°]	Longitud [°]	V_{S30} [m/s]	T^* [s]	NCh433.Of1996	Propuesta	Genérico
107	PUTR	Putre	SMA-1 7098	-18.195	-69.559	–	banda	F*	VI ^{nc}	Soil
108	QUIN	Quintay		-33.170	-71.700	595	banda	B	VI ^{nc}	Soil
109	R08M		EPI	-33.401	-71.120	–	0.21	B*	III ⁴	Soil
110	RAP	Rapel		-34.020	-71.670	3010	plano	A	I ¹	Rock
111	ROBL	Cerro El Roble Recinto SHOA	FBA ES-T	-32.976	-71.016	–	banda	F*	VI ^{nc}	Soil
112	SANT	Santiago Conjunto Villa Andalucía	SSA-2 935	-33.467	-70.652	–	0.44	D*	IV ²	Soil
113	SFEL	San Felipe		-32.750	-70.730	502	plano	B	I ¹	Rock
114	SFER	San Fernando		-34.460	-71.000	543	0.39	B	III ³	Soil
115	SJCH	San José de Maipo Municipalidad	FBA ES-T	-33.647	-70.354	570	0.83	B	V ⁴	Soil
116	SLUC	Santiago Cerro Santa Lucía	FBA ES-T	-33.440	-70.640	–	plano	A*	I ¹	Rock
117	SPAT	San Pedro de Atacama	ETNA 6153	-22.911	-68.200	–	1.77	E*	V ³	Soil
118	T01A		EPI	-20.273	-70.122	–	0.74	E*	IV ²	Soil
119	T02A	Alto Hospicio Cerro	EPI	-20.252	-70.118	277	0.67	D	IV ³	Soil
120	T03A	Regimiento Granaderos	EPI	-20.230	-70.146	809	0.15	B	II ⁴	Soil
121	T04A		EPI	-20.239	-70.133	–	plano	A*	I ¹	Rock
122	T05A	Iquique Serviu Iquique Hospital		-20.210	-70.150	811	plano	B	I ¹	Rock
123	T06A	Regional Dr. Ernesto Torres Galdames	EPI	-20.230	-70.146	–	0.34	C*	III ²	Soil
124	T07A	Pozo Almonte	EPI	-20.256	-69.786	344	0.37	D	III ⁴	Soil
125	T08A	Alto Hospicio ciudad	EPI	-20.270	-70.094	684	0.66	B	IV ²	Soil
126	T09A		EPI	-19.596	-70.211	–	plano	A*	I ¹	Rock
127	T10A	Huara	EPI	-19.995	-69.767	417	0.38	C	III ³	Soil
128	T11A		EPI	-19.312	-69.427	–	1.15	E*	V ³	Soil
129	T12A		EPI	-20.071	-69.217	–	0.36	D*	III ²	Soil
130	T13A	Tenencia de Pica	EPI	-20.497	-69.337	357	0.46	C	IV ³	Soil

Tabla A.2: — Continuación.

#	Código	Estación Referencia	Instrumento	Localización		V_{S30} [m/s]	T^* [s]	Información geotécnica		
				Latitud [°]	Longitud [°]			NCh433.Of1996	Propuesta	Genérico
131	TA01		EPI	-20.566	-70.181	–	0.22	B*	III ²	Soil
132	TA02		EPI	-20.270	-70.131	–	0.25	C*	III ³	Soil
133	TAL	Talca Colegio Integrado San Pío X	SMA-1 4568	-35.430	-71.630	648	banda	B	VI ^{nc}	Soil
134	TALA	Talagante	QDR 670	-33.660	-70.920	–	0.29	C*	III ⁴	Soil
135	TOCO	Tocopilla	SMA-1 6736	-22.090	-70.201	–	plano	A*	I ¹	Rock
136	TOCP	Tocopilla Puerto	ETNA 6152	-22.094	-70.209	–	plano	A*	I ¹	Rock
137	TOR	Las Tórtolas		-33.100	-70.750	–	plano	A*	I ¹	Rock
138	V01A		EPI	-33.053	-71.622	–	banda	F*	VI ^{nc}	Soil
139	V02A		EPI	-33.023	-71.518	–	0.14	B*	II ⁴	Soil
140	V03A		EPI	-33.055	-71.439	–	0.12	A*	II ⁴	Soil
141	V04A		EPI	-32.251	-70.931	–	0.35	D*	III ⁴	Soil
142	V09A		EPI	-33.048	-71.604	–	0.70	E*	IV ⁴	Soil
143	V11A		EPI	-32.756	-70.726	–	0.13	A*	II ⁴	Soil
144	VA01	Torpederas	EPI	-33.023	-71.637	–	0.14	B*	II ³	Soil
145	VA03	San Esteban	EPI	-32.764	-70.551	–	banda	F*	VI ^{nc}	Soil
146	VA05	Santo Domingo	EPI	-33.657	-71.614	–	0.59	D*	IV ³	Soil
147	VAL	Valparaíso Almendral	SMA-1 4567	-33.030	-71.620	360	0.87	C	V ³	Soil
148	VALD	Valdivia Hospital	QDR 761	-39.831	-73.239	274	banda	D	VI ^{nc}	Soil
149	VALLE	Vallenar Liceo Santa Marta	QDR	-28.577	-70.755	–	0.17	B*	II ³	Soil
150	VALU	Valparaíso UTFSM	SMA-1 6976	-33.030	-71.620	1421	0.16	A	II ²	Soil
151	VEN	Ventanas		-32.730	-71.620	331	1.08	D	V ⁴	Soil
152	VICH	Los Vilos		-31.920	-71.500	1215	plano	A	I ¹	Rock
153	VINA	Viña del Mar Centro	QDR 675	-33.025	-71.553	273	banda	D	VI ^{nc}	Soil
154	ZACH	Zapallar	QDR	-32.570	-71.470	605	plano	B	I ¹	Rock

A.3. Información de procesamiento de registros

Tabla A.3: Frecuencias de esquina utilizadas en la aplicación de filtros para cada componente de los registros de aceleraciones. Se indican además los límites de uso de los espectros de respuesta a 5 % de amortiguamiento.

#	Registro		Canal 1				Canal 2				Canal 3			
	Estación	Evento	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]
1	ALHO	0604092050	0.10	25	0.04	7.8	0.10	25	0.04	6.0	0.10	25	0.04	4.7
2	ALHO	0711141540	0.10	25	–	8.0	0.10	25	–	5.8	0.10	25	–	6.8
3	ALHO	0802041701	0.10	25	0.04	8.2	0.10	25	0.04	9.1	0.10	25	0.04	5.9
4	ALHO	0803011951	0.10	25	0.04	5.5	0.10	25	–	10.0	0.10	25	0.04	6.9
5	ALHO	0911130305	0.10	25	–	6.7	0.10	25	–	6.8	0.10	25	0.04	6.6
6	ANGO	NU2270634	0.10	25	–	5.9	0.10	25	–	6.6	0.10	25	–	6.5
7	ANTO	9801301216	0.06	–	–	7.4	0.06	–	–	7.6	0.06	–	–	5.0
8	ANTO	0711141540	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	6.6	0.06	–	–	7.8
9	ARIC	0507131206	0.06	40	–	10.0	0.06	40	–	10.0	0.06	40	–	10.0
10	ARIC	0911130305	0.06	40	–	10.0	0.06	40	–	10.0	0.06	40	–	10.0
11	ARIC	9911300401	0.06	40	–	10.0	0.06	40	–	10.0	0.06	40	–	10.0
12	ACEM	0506132244	0.20	25	–	3.5	0.20	25	–	3.6	0.20	25	0.04	2.4
13	ACEM	0507131206	0.20	25	–	3.4	0.20	25	0.04	2.9	0.20	25	0.04	1.9
14	ACEM	9911300401	0.20	25	0.04	2.1	0.20	25	0.04	1.9	0.20	25	0.04	1.1
15	ACRU	0506132244	0.06	–	–	8.6	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
16	ACRU	0507131206	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
17	ACRU	0611201438	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
18	ACHA	0107070938	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
19	ACHA	0108080333	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
20	ACHA	0507131206	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
21	ACHA	0611201438	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
22	ACO	0506132244	0.20	25	–	3.4	0.20	25	–	2.6	0.20	25	0.04	2.6
23	ACO	0507131206	0.20	25	–	4.1	0.20	25	–	3.2	0.20	25	0.04	3.8
24	ACO	9911300401	0.20	25	–	3.0	0.20	25	–	2.4	0.20	25	0.04	1.5
25	CALA	0506132244	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
26	CALA	0711141540	0.06	–	–	8.8	0.06	–	–	8.1	0.06	–	–	9.4
27	CONC	NU2270634	0.20	25	–	4.0	0.20	25	–	3.3	0.20	25	–	3.9
28	CONT	NU2270634	0.20	25	–	2.8	0.20	25	–	3.4	0.20	25	0.04	4.3

Tabla A.3: — Continuación.

#	Registro		Canal 1				Canal 2				Canal 3			
	Estación	Evento	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]
29	COPI	0604301917	0.10	25	–	5.3	0.10	25	–	6.9	0.10	25	–	5.3
30	COPI	0604302140	0.10	25	–	5.7	0.10	25	–	4.1	0.10	25	–	5.4
31	CURI	NU2270634	0.10	25	–	6.4	0.10	25	–	7.3	0.10	25	–	5.8
32	CURI	NU2281125	0.10	25	–	5.0	0.10	25	–	7.5	0.10	25	0.04	4.4
33	CUY	0506132244	0.20	25	–	2.6	0.20	25	–	3.4	0.20	25	0.04	3.7
34	CUY	0911130305	0.20	25	–	2.5	0.20	25	–	2.2	0.20	25	–	1.2
35	LOA	0506132244	0.20	25	0.04	3.5	0.20	25	0.04	3.6	0.20	25	0.04	3.4
36	LOA	0711141540	0.20	25	0.04	2.6	0.20	25	0.04	2.3	0.20	25	0.04	3.0
37	FUBA	0711141540	0.10	25	–	5.6	0.10	25	–	8.0	0.10	25	0.04	9.2
38	FUBA	0803242039	0.10	25	0.04	5.1	0.10	25	0.04	7.8	0.10	25	0.04	5.1
39	HUAL	NU2270634	0.20	25	–	3.0	0.20	25	–	2.8	0.20	25	–	2.8
40	HUAR	0911130305	0.20	25	–	2.6	0.20	25	–	0.7	0.20	25	0.04	1.1
41	ILLA	9710150103	0.20	25	0.04	3.2	0.20	25	0.04	3.4	0.20	25	0.04	3.9
42	ILLA	9711031917	0.20	25	0.04	0.8	0.20	25	0.04	2.2	0.20	25	0.04	1.9
43	IQUI	0506132244	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
44	IQUI	0711141540	0.06	–	–	9.6	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	7.7
45	IQUI	0802041701	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	NU	10.0
46	IQUI	0803011951	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
47	IQID	0506132244	0.20	25	–	3.4	0.20	25	–	2.3	0.20	25	0.04	3.4
48	IQEC	0802041701	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
49	IQEC	0803011951	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
50	IQEC	0803242039	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
51	IQEC	0911130305	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.6
52	IQPZ	0506132244	0.20	25	–	3.3	0.20	25	–	3.5	0.20	25	0.04	2.7
53	LSER	0206181356	0.20	25	–	1.2	0.20	25	–	2.6	0.20	25	–	1.2
54	LLO	0006160755	0.20	25	–	2.4	0.20	25	–	3.4	0.20	25	–	2.0
55	LLO	NU2270634	0.20	25	–	3.5	0.20	25	–	3.4	0.20	25	–	3.2
56	LLO	9602221340	0.20	25	0.04	2.0	0.20	25	0.04	2.5	0.20	25	0.04	2.2
57	MAT	NU2270634	0.20	–	–	3.5	0.20	–	–	2.8	0.20	–	–	3.0
58	MEJI	0506132244	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0

Tabla A.3: — Continuación.

#	Registro		Canal 1				Canal 2				Canal 3			
	Estación	Evento	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]
59	MEJI	0711141540	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
60	MEJI	0711151503	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
61	MEJI	0711151506	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
62	MEJI	0711170307	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
63	MEJI	0712160809	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
64	MJCE	0712160809	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
65	MJPU	0712130723	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
66	MJPU	0712160809	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
67	MICH	0712160809	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	NU	10.0
68	PAP	0006160755	0.20	25	–	3.2	0.20	25	–	1.7	0.20	25	0.04	1.9
69	PAP	NU2270634	0.20	25	–	2.9	0.20	25	–	3.0	0.20	25	–	2.6
70	PAP	9710150103	0.20	25	–	2.2	0.20	25	–	2.9	0.20	25	–	1.5
71	PPAT	0711141540	0.06	–	–	9.1	0.06	–	–	9.2	0.06	–	–	8.4
72	PICA	0506132244	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.3	0.06	–	–	10.0
73	PICA	0508130239	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
74	PICA	0710250835	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
75	PICA	0711141540	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.8	0.06	–	–	7.9
76	PICA	0802041701	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.8
77	PICA	0803011951	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
78	PICA	0803242039	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
79	PIS	0506132244	0.20	25	0.04	3.2	0.20	25	0.04	3.3	0.20	25	0.04	3.9
80	PIS	0711141540	0.20	25	0.04	4.8	0.20	25	0.04	3.6	0.20	25	0.04	3.7
81	PIS	0904160208	0.20	25	0.04	2.9	0.20	25	0.04	5.0	0.20	25	0.04	3.5
82	PIS	0911130305	0.20	25	0.04	4.1	0.20	25	0.04	2.5	0.20	25	0.04	3.4
83	POCO	0711141540	0.20	25	–	4.2	0.20	25	–	3.8	0.20	25	0.04	3.7
84	POCO	0506132244	0.20	25	0.04	2.9	0.20	25	–	3.7	0.20	25	0.04	3.3
85	POCO	0507131206	0.20	25	–	4.6	0.20	25	–	8.8	0.20	25	0.04	3.9
86	POCO	0611201438	0.20	25	0.04	10.0	0.20	25	0.04	10.0	0.20	25	0.04	3.5
87	PAMO	0205230023	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.6
88	PAMO	0206181356	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0

Tabla A.3: — Continuación.

#	Registro		Canal 1				Canal 2				Canal 3			
	Estación	Evento	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]
89	PAMO	0306201330	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
90	PAMO	0401NU725	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
91	PAMO	0610121805	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
92	PUTR	0506132244	0.20	25	–	3.4	0.20	25	–	3.3	0.20	25	–	3.9
93	SPAT	0711141540	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
94	SANT	NU2270634	0.06	40	–	10.0	0.06	40	–	10.0	0.06	40	–	9.3
95	SANT	9703250014	0.06	40	–	5.1	0.06	40	–	6.0	0.06	40	–	1.6
96	SANT	9710150103	0.06	40	–	9.9	0.06	40	–	10.0	0.06	40	–	10.0
97	MET	0006160755	0.06	40	–	10.0	0.06	40	–	10.0	0.06	40	–	10.0
98	MET	NU2270634	0.06	40	–	10.0	0.06	40	–	8.9	0.06	40	–	8.1
99	MET	9908010106	0.06	40	–	10.0	0.06	40	–	10.0	0.06	40	–	10.0
NU	CRMA	NU2270634	0.10	25	–	7.5	0.10	25	–	7.8	0.10	25	–	5.6
101	HTIS	NU2270634	0.10	25	–	7.0	0.10	25	–	6.8	0.10	25	–	7.7
102	HSOR	NU2270634	0.10	25	–	5.2	0.10	25	–	7.3	0.10	25	0.04	5.7
103	TAL	NU2270634	0.20	25	–	2.9	0.20	25	–	3.5	0.20	25	0.04	3.7
104	TOCO	0711141540	0.20	25	0.04	3.2	0.20	25	0.04	3.0	0.20	25	0.04	2.9
105	TOCO	9507300511	0.20	25	–	2.1	0.20	25	0.04	2.1	0.20	25	0.04	2.5
106	TOCP	0712160809	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
107	VALD	NU2270634	0.10	25	–	7.7	0.10	25	–	7.5	0.10	25	–	6.5
108	VALU	NU2270634	0.20	25	–	3.6	0.20	25	–	3.2	0.20	25	–	3.6
109	VAL	0712151822	0.20	25	–	1.7	0.20	25	–	3.4	0.20	25	–	2.1
110	VAL	NU2270634	0.20	25	–	3.3	0.20	25	–	2.8	0.20	25	–	3.9
111	VINA	0409272258	0.10	25	–	6.2	0.10	25	–	3.7	0.10	25	–	4.8
112	VINA	0712151822	0.10	25	–	6.7	0.10	25	–	4.7	0.10	25	0.04	7.2
113	VINA	NU2270634	0.10	25	–	5.7	0.10	25	–	3.9	0.10	25	–	5.2
114	MAR	0712151822	0.10	25	–	10.0	0.10	25	–	10.0	0.10	25	0.04	10.0
115	MAR	0812190936	0.10	25	–	10.0	0.10	25	–	10.0	0.10	25	–	9.8
116	MAR	NU2270634	0.10	25	–	6.9	0.10	25	–	7.8	0.10	25	0.04	5.5
117	MAR	0409272258	0.10	25	–	10.0	0.10	25	–	10.0	0.10	25	–	6.3
118	LLAY	8503032247	0.20	–	–	3.6	0.20	–	–	3.8	0.20	–	–	10.0

Tabla A.3: — Continuación.

#	Registro		Canal 1				Canal 2				Canal 3			
	Estación	Evento	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]
119	LLO	8503032247	0.20	25	–	2.9	0.20	25	–	3.6	0.20	25	–	3.3
120	TOR	8503032247	0.20	–	–	3.4	0.20	–	–	9.6	0.20	–	–	3.8
121	ISI	8503032247	0.20	–	–	8.7	0.20	–	–	3.1	0.20	–	–	10.0
122	SFER	8503032247	0.20	–	–	6.2	0.20	–	–	8.5	0.20	–	–	3.6
123	SFEL	8503032247	0.20	–	–	3.3	0.20	–	–	3.2	0.20	–	–	10.0
124	END	8503032247	0.20	–	–	10.0	0.20	–	–	10.0	0.20	–	–	10.0
125	CAU	8503032247	0.20	–	–	3.8	0.20	–	–	3.2	0.20	–	–	3.9
126	CHIL	8503032247	0.20	–	–	3.2	0.20	–	–	3.6	0.20	–	–	3.2
127	CON85	8503032247	0.20	–	–	3.4	0.20	–	–	10.0	0.20	–	–	3.2
128	HUA85	8503032247	0.20	–	–	9.2	0.20	–	–	4.2	0.20	–	–	10.0
129	ILLA	8503032247	0.20	25	–	3.0	0.20	25	–	3.2	0.20	25	0.04	3.3
130	ILO	8503032247	0.20	–	–	3.2	0.20	–	–	3.6	0.20	–	–	3.6
131	MELP	8503032247	0.10	25	–	10.0	0.10	25	0.04	10.0	0.10	25	0.04	10.0
132	PICH	8503032247	0.10	25	–	10.0	0.10	25	–	10.0	0.10	25	0.04	10.0
133	QUIN	8503032247	0.20	–	–	3.3	0.20	–	–	3.9	0.20	–	–	3.7
134	RAP	8503032247	0.20	–	–	3.3	0.20	–	–	2.7	0.20	–	–	3.0
135	TAL	8503032247	0.20	25	–	4.1	0.20	25	–	10.0	0.20	25	0.04	2.9
136	VALU	8503032247	0.20	25	–	3.5	0.20	25	0.04	3.0	0.20	25	0.04	3.6
137	VEN	8503032247	0.20	–	–	3.7	0.20	–	–	4.5	0.20	–	–	3.4
138	VICH	8503032247	0.20	–	–	3.3	0.20	–	–	3.5	0.20	–	–	3.3
139	VINA	8503032247	0.10	25	–	10.0	0.10	25	–	10.0	0.10	25	0.04	10.0
140	ZACH	8503032247	0.10	25	–	10.0	0.10	25	–	8.3	0.10	25	0.04	10.0
141	END	8503032338	0.20	–	–	10.0	0.20	–	–	9.2	0.20	–	–	9.8
142	LLO	8503032338	0.20	25	–	10.0	0.20	25	–	10.0	0.20	25	–	2.5
143	VALU	8503032338	0.20	25	–	4.0	0.20	25	–	10.0	0.20	25	0.04	3.2
144	VINA	8503032338	0.10	25	–	10.0	0.10	25	–	9.7	0.10	25	–	10.0
145	LIG	8111111737	0.20	–	–	2.4	0.20	–	–	3.7	0.20	–	–	2.7
146	PAP	8111111737	0.20	25	0.04	3.1	0.20	25	0.04	2.6	0.20	25	0.04	2.8
147	CAU	8504090157	0.20	–	–	5.1	0.20	–	–	5.3	0.20	–	–	7.1
148	CON85	8504090157	0.20	–	–	4.1	0.20	–	–	4.4	0.20	–	–	3.4

Tabla A.3: — Continuación.

#	Registro		Canal 1				Canal 2				Canal 3			
	Estación	Evento	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]
149	ILO	8504090157	0.20	–	–	10.0	0.20	–	–	7.0	0.20	–	–	8.6
150	QUIN	8504090157	0.20	–	–	9.4	0.20	–	–	5.3	0.20	–	–	8.2
151	RAP	8504090157	0.20	–	–	3.6	0.20	–	–	3.3	0.20	–	–	3.6
152	SFER	8504090157	0.20	–	–	10.0	0.20	–	–	6.2	0.20	–	–	8.0
153	END	8504090157	0.20	–	–	10.0	0.20	–	–	3.4	0.20	–	–	2.6
154	VEN	8504090157	0.20	–	–	4.7	0.20	–	–	8.5	0.20	–	–	6.4
155	DGF	8504090157	0.20	–	–	10.0	0.20	–	–	7.7	0.20	–	–	9.7
156	PB01	0711141540	0.06	–	–	9.0	0.06	–	–	9.0	0.06	–	–	10.0
157	PB04	0711141540	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
158	PB06	0711141540	0.06	–	–	8.5	0.06	–	–	8.4	0.06	–	NU	10.0
159	PB07	0711141540	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.8	0.06	–	–	8.3
160	PB08	0711141540	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.9
161	PB04	0712160809	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
162	PB07	0712160809	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
163	ANTU	NU2270634	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	NU	10.0
164	ROBL	NU2270634	0.06	–	–	9.6	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
165	SLUC	NU2270634	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.1	0.06	–	–	8.6
166	CBCH	NU2270634	0.10	25	–	7.7	0.10	25	–	5.5	0.10	25	–	5.0
167	CSCH	NU2270634	0.10	25	–	5.4	0.10	25	–	5.9	0.10	25	–	5.4
168	COLB	NU2270634	0.20	–	–	3.0	0.20	–	–	2.9	0.20	–	–	3.0
169	CVCH	NU2270634	0.20	–	–	3.3	0.20	–	–	3.6	0.20	–	–	3.2
170	LACH	NU2270634	0.06	–	–	9.5	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.7
171	MOCH	NU2270634	0.10	25	–	5.3	0.10	25	–	7.2	0.10	25	–	6.3
172	VICH	NU2270634	0.20	–	–	3.5	0.20	–	–	3.2	0.20	–	–	3.2
173	MELP	NU2270634	0.10	25	0.04	7.1	0.10	25	0.04	7.8	0.10	25	0.04	6.6
174	OLMU	NU2270634	0.20	–	–	2.7	0.20	–	–	4.1	0.20	–	–	3.7
175	PICH	NU2270634	0.10	25	–	6.6	0.10	25	0.04	3.8	0.10	25	0.04	8.0
176	SJCH	NU2270634	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.5
177	CCSP	NU2270634	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.8	0.06	–	–	9.7
178	ZACH	NU2270634	0.10	25	0.04	6.0	0.10	25	0.04	5.9	0.10	25	0.04	6.6

Tabla A.3: — Continuación.

#	Registro		Canal 1				Canal 2				Canal 3			
	Estación	Evento	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]
179	RAP	NU2270634	0.20	–	–	3.4	0.20	–	–	3.6	0.20	–	–	3.0
180	FCFM	NU2270634	0.20	–	–	3.7	0.20	–	–	3.4	0.20	–	–	3.4
181	ILO	8503040032	0.20	–	–	1.8	0.20	–	–	4.0	0.20	–	–	2.3
182	SFER	8503040032	0.20	–	–	10.0	0.20	–	–	10.0	0.20	–	–	10.0
183	CONT	8503250514	0.20	25	–	2.6	0.20	25	–	2.0	0.20	25	–	2.1
184	ILO	8503250514	0.20	–	–	2.7	0.20	–	–	4.0	0.20	–	–	2.3
185	PB15	1405161708	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
186	TA01	1405301532	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	NU	10.0
187	TA02	1405301532	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
188	PATCX	1405301532	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
189	PB01	1405301532	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	NU	10.0
190	PB04	1405301532	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
191	PB09	1405301532	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
192	PB08	1407232139	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
193	AP01	1404012346	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.3
194	TA01	1404012346	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.0	0.06	–	–	9.7
195	HMBCX	1404012346	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.3	0.06	–	–	8.9
196	MNMCX	1404012346	0.06	–	–	7.9	0.06	–	–	9.9	0.06	–	–	9.7
197	PATCX	1404012346	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.0	0.06	–	–	8.9
198	PB01	1404012346	0.06	–	–	8.0	0.06	–	–	9.1	0.06	–	–	6.9
199	PB03	1404012346	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.0	0.06	–	–	10.0
200	PB04	1404012346	0.06	–	–	9.3	0.06	–	–	9.8	0.06	–	–	9.7
201	PB05	1404012346	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	7.8	0.06	–	–	10.0
202	PB06	1404012346	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.7	0.06	–	–	9.6
203	PB07	1404012346	0.06	–	–	8.6	0.06	–	–	9.5	0.06	–	–	9.4
204	PB08	1404012346	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.4	0.06	–	–	6.2
205	PB09	1404012346	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.6
206	PB10	1404012346	0.06	–	–	5.8	0.06	–	–	7.3	0.06	–	–	8.2
207	PB11	1404012346	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.0
208	PB12	1404012346	0.06	–	–	9.9	0.06	–	–	8.9	0.06	–	–	8.8

Tabla A.3: — Continuación.

#	Registro		Canal 1				Canal 2				Canal 3			
	Estación	Evento	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]
209	PB15	1404012346	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.1	0.06	–	–	8.1
210	PB16	1404012346	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	7.8	0.06	–	–	10.0
211	AP01	1404012357	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.9
212	HMBCX	1404012357	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
213	MNM CX	1404012357	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
214	PB01	1404012357	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
215	PB03	1404012357	0.06	–	–	9.6	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
216	PB04	1404012357	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
217	PB07	1404012357	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
218	PB08	1404012357	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
219	PB09	1404012357	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
220	PB11	1404012357	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
221	PB12	1404012357	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.6	0.06	–	–	10.0
222	PB16	1404012357	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
223	HMBCX	1404030158	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.7
224	PB01	1404030158	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.0	0.06	–	–	9.6
225	PB11	1404030158	0.06	–	–	8.5	0.06	–	–	9.0	0.06	–	–	8.3
226	PSGCX	1404030158	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	6.6	0.06	–	–	10.0
227	AP01	1404030243	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.3	0.06	–	–	8.8
228	TA01	1404030243	0.06	–	–	8.6	0.06	–	–	10.0	0.06	–	NU	7.7
229	HMBCX	1404030243	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	NU	8.8
230	MNM CX	1404030243	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.2	0.06	–	–	10.0
231	PB01	1404030243	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.6	0.06	–	–	5.7
232	PB03	1404030243	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.8	0.06	–	–	8.3
233	PB04	1404030243	0.06	–	–	9.8	0.06	–	–	9.1	0.06	–	–	7.2
234	PB05	1404030243	0.06	–	–	7.6	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	7.8
235	PB06	1404030243	0.06	–	–	9.1	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
236	PB07	1404030243	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
237	PB08	1404030243	0.06	–	–	8.1	0.06	–	–	9.1	0.06	–	–	8.0
238	PB09	1404030243	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0

Tabla A.3: — Continuación.

#	Registro		Canal 1				Canal 2				Canal 3			
	Estación	Evento	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]
239	PB10	1404030243	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	7.8	0.06	–	–	6.2
240	PB11	1404030243	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	6.3
241	PB12	1404030243	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.5	0.06	–	–	5.5
242	PB15	1404030243	0.06	–	–	9.7	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.6
243	PB16	1404030243	0.06	–	–	6.1	0.06	–	–	9.2	0.06	–	–	6.6
244	PSGCX	1404030243	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	5.0	0.06	–	–	9.9
245	HMBCX	1404030526	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.6
246	PB01	1404030526	0.06	–	–	9.9	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
247	PB07	1404030526	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.8	0.06	–	–	10.0
248	HMBCX	1404040137	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.7	0.06	–	–	10.0
249	PB01	1404040137	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
250	PB11	1404040137	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.7
251	PSGCX	1404040137	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.8	0.06	–	–	9.0
252	HMBCX	14041NU01	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
253	PATCX	14041NU01	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
254	PB01	14041NU01	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
255	PB07	14041NU01	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
256	PSGCX	14041NU01	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
257	PATCX	1404131211	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.6
258	T07A	1404012346	0.06	–	–	7.2	0.06	–	–	8.7	0.06	–	–	10.0
259	T08A	1404012346	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	7.2	0.06	–	–	10.0
260	T09A	1404012346	0.06	–	–	8.0	0.06	–	–	7.7	0.06	–	–	7.7
261	T10A	1404012346	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.1	0.06	–	–	10.0
262	T03A	1404012346	0.06	–	–	8.4	0.06	–	–	7.5	0.06	–	–	10.0
263	T05A	1404012346	0.20	–	–	3.2	0.20	–	–	3.1	0.20	–	–	2.9
264	T06A	1404012346	0.06	–	–	8.4	0.06	–	–	7.1	0.06	–	–	10.0
265	T13A	1404012346	0.06	–	–	9.2	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.8
266	T03A	1404030243	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	6.6	0.06	–	–	4.3
267	T05A	1404030243	0.20	–	–	2.9	0.20	–	–	3.9	0.20	–	–	2.2
268	T06A	1404030243	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	6.7	0.06	–	–	4.3

Tabla A.3: — Continuación.

#	Registro		Canal 1				Canal 2				Canal 3			
	Estación	Evento	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]
269	T13A	1404030243	0.06	–	–	9.4	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
270	T05A	1404030526	0.20	–	–	3.5	0.20	–	–	3.7	0.20	–	–	3.5
271	AP01	140129NU1	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
272	CO04	1404050222	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
273	FAR1	1210111722	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
274	GO01	1307101432	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
275	GO01	1403311253	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
276	GO01	1404012346	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	7.8
277	GO01	1404030243	0.06	–	–	8.1	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.7
278	GO03	1301302015	0.20	–	–	3.7	0.20	–	–	3.3	0.20	–	NU	9.9
279	GO04	1211141902	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
280	GO04	1310312303	0.06	–	–	7.9	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
281	HMBCX	1106201635	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
282	HMBCX	1403170511	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.6	0.06	–	–	10.0
283	LSCH	1211141902	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
284	LSCH	1310312303	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.3	0.06	–	–	8.9
285	MNMCX	1103061231	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
286	MNMCX	120514NU0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
287	MNMCX	1307101432	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	NU	10.0
288	MNMCX	140129NU1	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
289	MNMCX	1403311253	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
290	PB01	1106201635	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
291	PB04	NU7120011	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
292	PB04	1106201635	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.8
293	PB06	1402121143	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	NU	10.0
294	PB07	NU7120011	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
295	PB07	1106201635	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
296	PB09	NU7120011	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
297	PB09	1308230834	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
298	PB10	1111050713	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0

Tabla A.3: — Continuación.

#	Registro		Canal 1				Canal 2				Canal 3			
	Estación	Evento	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]
299	PB11	NU6261901	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	4.3
300	PB11	1106201635	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
301	PB11	1307101432	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	NU	10.0
302	PB11	1403311253	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	NU	7.7
303	PB12	120514NU0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	NU	10.0
304	PB13	NU5060242	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
305	PB13	1103061231	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
306	PB16	120514NU0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
307	ROBL	1210111722	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
308	ROBL	1404050222	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
309	T01A	1404071343	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
310	T01A	14041NU01	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
311	T01A	1404131211	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
312	T01A	1405301532	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
313	T02A	14041NU01	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
314	T02A	1404131211	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
315	T02A	1405301532	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
316	T03A	1403170511	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.4	0.06	–	–	10.0
317	T03A	1403241126	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
318	T03A	1404020446	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
319	T03A	1404030158	0.06	–	–	9.6	0.06	–	–	9.6	0.06	–	–	7.9
320	T03A	1404030526	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.0	0.06	–	–	10.0
321	T03A	1404040137	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.2	0.06	–	–	10.0
322	T03A	1404071343	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
323	T03A	14041NU01	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
324	T03A	1404131211	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
325	T03A	1405170911	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
326	T03A	1405301532	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
327	T03A	1406190938	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.2	0.06	–	–	10.0
328	T04A	1404071343	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0

Tabla A.3: — Continuación.

#	Registro		Canal 1				Canal 2				Canal 3			
	Estación	Evento	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]
329	T04A	14041NU01	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
330	T04A	1405170911	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
331	T04A	1405301532	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
332	T05A	1404030158	0.20	–	–	8.6	0.20	–	–	3.0	0.20	–	–	4.6
333	T05A	1404040137	0.20	–	–	3.1	0.20	–	–	3.5	0.20	–	–	3.9
334	T05A	1404071343	0.20	–	–	4.0	0.20	–	–	3.5	0.20	–	–	5.2
335	T05A	14041NU01	0.20	–	–	5.5	0.20	–	–	3.7	0.20	–	–	4.4
336	T05A	1405170911	0.20	–	–	3.5	0.20	–	–	3.2	0.20	–	–	3.3
337	T05A	1405301532	0.20	–	–	5.7	0.20	–	–	10.0	0.20	–	–	6.1
338	T05A	1406190938	0.20	–	–	3.5	0.20	–	–	3.6	0.20	–	–	3.5
339	T06A	1403170511	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.1	0.06	–	–	10.0
340	T06A	1404030158	0.06	–	–	9.3	0.06	–	–	9.6	0.06	–	–	8.1
341	T06A	1404030526	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.9	0.06	–	–	10.0
342	T06A	1404040137	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.2	0.06	–	–	10.0
343	T06A	14041NU01	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
344	T06A	1404131211	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
345	T06A	1405170911	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
346	T06A	1405301532	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
347	T06A	1406190938	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.0	0.06	–	–	10.0
348	T07A	1403170511	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
349	T07A	1404012357	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
350	T07A	1404030158	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.7
351	T07A	1404030243	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.5	0.06	–	–	9.0
352	T07A	1404030526	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
353	T07A	1404040137	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
354	T07A	14041NU01	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
355	T07A	1405301532	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
356	T08A	1403170511	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.8	0.06	–	–	10.0
357	T08A	1404030158	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.8
358	T08A	1404030243	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	3.9

Tabla A.3: — Continuación.

#	Registro		Canal 1				Canal 2				Canal 3			
	Estación	Evento	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]
359	T08A	1404030526	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
360	T08A	1404040137	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	7.6	0.06	–	–	10.0
361	T08A	1404071343	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
362	T08A	14041NU01	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
363	T08A	1405301532	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
364	T09A	1403170511	0.06	–	–	9.2	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
365	T09A	1404030158	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	6.4	0.06	–	–	10.0
366	T09A	1404030243	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	6.9	0.06	–	–	9.0
367	T09A	14041NU01	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
368	T10A	1403311253	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
369	T10A	1404012357	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
370	T10A	1404030158	0.06	–	–	7.9	0.06	–	–	8.5	0.06	–	–	9.6
371	T10A	1404030243	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.4
372	T10A	1404030526	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
373	T10A	1404040137	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.4	0.06	–	–	10.0
374	T10A	14041NU01	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
375	T12A	1404030243	0.06	–	–	9.2	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.0
376	T12A	1407232139	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
377	T13A	1404030158	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
378	T13A	1404040137	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
379	T13A	1405301532	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
380	T13A	1407232139	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.4	0.06	–	–	10.0
381	VA03	1404050222	0.06	–	–	9.4	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
382	ALHO	1104021059	0.10	25	0.04	9.5	0.10	25	0.04	6.8	0.10	25	0.04	3.9
383	ALHO	1106201635	0.10	25	0.04	6.9	0.10	25	0.04	6.3	0.10	25	–	7.3
384	ALHO	120514NU0	0.10	25	0.04	6.0	0.10	25	0.04	7.5	0.10	25	0.04	6.4
385	ALHO	1403170511	0.10	25	–	7.7	0.10	25	–	7.3	0.10	25	–	6.1
386	ALHO	1404012346	0.10	25	–	4.7	0.10	25	–	8.3	0.10	25	–	6.2
387	ALHO	1404030158	0.10	25	0.04	7.3	0.10	25	–	6.6	0.10	25	0.04	5.9
388	ALHO	1404030243	0.10	25	–	6.9	0.10	25	–	5.1	0.10	25	–	4.0

Tabla A.3: — Continuación.

#	Registro		Canal 1				Canal 2				Canal 3			
	Estación	Evento	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]
389	ANGO	1102112005	0.10	25	–	6.1	0.10	25	–	3.9	0.10	25	0.04	5.7
390	ACEM	120514NU0	0.20	25	–	6.1	0.20	25	–	6.8	0.20	25	–	3.9
391	ACRU	120514NU0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
392	ACRU	140129NU1	0.06	–	–	6.7	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.4
393	ACRU	1404012346	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.4	0.06	–	–	8.6
394	ACRU	1404030243	0.06	–	–	9.0	0.06	–	–	9.8	0.06	–	–	4.3
395	ACHA	1103061231	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
396	ACHA	120514NU0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
397	ACHA	140129NU1	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
398	ACHA	1404012346	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	7.4
399	ACHA	1404030243	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	5.9
400	ACO	1103061231	0.20	25	–	2.9	0.20	25	–	4.0	0.20	25	0.04	3.1
401	ACO	120514NU0	0.20	25	–	8.9	0.20	25	–	2.9	0.20	25	0.04	3.8
402	ACO	140129NU1	0.20	25	0.04	3.4	0.20	25	0.04	2.7	0.20	25	0.04	2.7
403	ACO	1404012346	0.20	25	–	3.7	0.20	25	–	4.7	0.20	25	–	3.7
404	ACO	1404030243	0.20	25	–	3.8	0.20	25	–	2.6	0.20	25	–	3.7
405	CALA	1106201635	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
406	CALA	12NU80150	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
407	CALA	1308230834	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
408	CALA	1402121143	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
409	CALA	1404012346	0.06	–	–	7.1	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.1
410	CALA	1404030243	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
411	CONC2	NU3251357	0.06	–	–	9.1	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.1
412	CONC2	NU4021934	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
413	CONC2	1101022020	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
414	CONC2	1102112005	0.06	–	–	8.6	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
415	CONC2	1102130851	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
416	CONC2	1102140340	0.06	–	–	7.7	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
417	CUY	1307101432	0.20	25	0.04	3.4	0.20	25	–	2.9	0.20	25	0.04	2.7
418	CUY	1404012346	0.20	25	–	3.5	0.20	25	–	3.4	0.20	25	–	3.0

Tabla A.3: — Continuación.

#	Registro		Canal 1				Canal 2				Canal 3			
	Estación	Evento	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]
419	LOA	1404012346	0.20	25	–	3.1	0.20	25	0.04	3.2	0.20	25	0.04	4.2
420	LOA	1404030243	0.20	25	0.04	3.4	0.20	25	0.04	3.4	0.20	25	0.04	2.9
421	LOA	1404030526	0.20	25	0.04	7.0	0.20	25	–	3.0	0.20	25	–	4.5
422	LOA	1404040137	0.20	25	–	4.2	0.20	25	–	5.6	0.20	25	–	7.9
423	LOA	14041NU01	0.20	25	–	1.9	0.20	25	–	3.2	0.20	25	–	3.3
424	FUBA	1104021059	0.10	25	0.04	8.1	0.10	25	0.04	4.6	0.10	25	0.04	6.7
425	FUBA	1307101432	0.10	25	0.04	6.4	0.10	25	0.04	5.8	0.10	25	0.04	6.0
426	FUBA	1403311253	0.10	25	0.04	3.3	0.10	25	0.04	5.6	0.10	25	0.04	4.3
427	FUBA	1404012346	0.10	25	–	6.3	0.10	25	–	8.2	0.10	25	0.04	4.6
428	IQEC	1103061231	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.4	0.06	–	–	10.0
429	IQEC	1104021059	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
430	IQEC	1106201635	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
431	IQEC	120514NU0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
432	IQEC	1401040011	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.5
433	IQEC	1403170511	0.06	–	–	9.9	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
434	IQEC	1403241126	0.06	–	–	9.2	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
435	IQEC	1404012346	0.06	–	–	8.5	0.06	–	–	7.8	0.06	–	–	10.0
436	IQEC	1404020446	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
437	IQEC	1404030158	0.06	–	–	9.5	0.06	–	–	9.9	0.06	–	–	7.8
438	IQEC	1404030243	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	4.3
439	IQEC	1404030526	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.7	0.06	–	–	10.0
440	IQEC	1404040137	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
441	IQEC	1404071343	0.06	–	–	9.4	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
442	IQEC	14041NU01	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
443	IQEC	1404131211	0.06	–	–	8.9	0.06	–	–	9.9	0.06	–	–	8.8
444	IQEC	1405170911	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
445	IQEC	1405301532	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
446	IQID	1403170511	0.20	25	–	3.5	0.20	25	–	2.0	0.20	25	0.04	3.5
447	IQID	1404012346	0.20	25	–	2.9	0.20	25	–	3.2	0.20	25	0.04	3.0
448	IQID	1404030158	0.20	25	–	5.0	0.20	25	–	5.7	0.20	25	0.04	4.4

Tabla A.3: — Continuación.

#	Registro		Canal 1				Canal 2				Canal 3			
	Estación	Evento	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]
449	IQID	1404030243	0.20	25	–	3.8	0.20	25	–	3.1	0.20	25	0.04	2.2
450	IQUI	0203280456	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
451	IQUI	1404012346	0.06	–	–	8.7	0.06	–	–	6.1	0.06	–	–	10.0
452	IQUI	1404030158	0.06	–	–	9.3	0.06	–	–	9.6	0.06	–	–	8.1
453	IQUI	1404030243	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	7.3	0.06	–	–	4.3
454	IQUI	1404030526	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.9
455	IQUI	1404040137	0.06	–	–	9.1	0.06	–	–	8.0	0.06	–	–	10.0
456	IQUI	14041NU01	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
457	LSER	1204300739	0.20	25	0.04	3.4	0.20	25	0.04	2.4	0.20	25	0.04	3.4
458	LSER	1211141902	0.20	25	0.04	3.5	0.20	25	–	2.9	0.20	25	–	3.3
459	LSER	1301302015	0.20	25	–	3.0	0.20	25	0.04	2.4	0.20	25	0.04	3.4
460	LSER	1310312303	0.20	25	–	3.1	0.20	25	–	2.9	0.20	25	0.04	2.5
461	MJPU	1106201635	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
462	MJPU	1111050713	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
463	MJPU	1404012346	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	6.9	0.06	–	–	9.1
464	MJPU	1404030243	0.06	–	–	9.6	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	7.8
465	MEJI	1404012346	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.6	0.06	–	–	10.0
466	MICH	1111050713	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.5	0.06	–	–	9.8
467	PICA	1104021059	0.06	–	–	1.8	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
468	PICA	1106201635	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
469	PICA	1404012346	0.06	–	–	8.9	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.9
470	PICA	1404030158	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.7	0.06	–	–	10.0
471	PICA	1404030243	0.06	–	–	9.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
472	PICA	1404040137	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
473	PIS	1103061231	0.20	25	0.04	3.8	0.20	25	0.04	4.3	0.20	25	0.04	3.2
474	PIS	1104021059	0.20	25	0.04	3.2	0.20	25	0.04	9.4	0.20	25	0.04	5.1
475	PIS	120514NU0	0.20	25	0.04	3.5	0.20	25	0.04	3.2	0.20	25	0.04	3.2
476	POCO	1103061231	0.20	25	0.04	4.5	0.20	25	0.04	5.0	0.20	25	0.04	3.6
477	POCO	120514NU0	0.20	25	–	6.7	0.20	25	0.04	10.0	0.20	25	0.04	7.2
478	POCO	140129NU1	0.20	25	0.04	10.0	0.20	25	0.04	10.0	0.20	25	0.04	4.7

Tabla A.3: — Continuación.

#	Registro		Canal 1				Canal 2				Canal 3			
	Estación	Evento	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]
479	POCO	1404012346	0.20	25	–	3.8	0.20	25	–	4.3	0.20	25	–	3.4
480	POCO	1404030243	0.20	25	–	3.6	0.20	25	–	3.9	0.20	25	–	3.9
481	PAMO	0204011959	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
482	PAMO	0306192304	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
483	PAMO	0412080603	0.06	–	–	9.2	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
484	PAMO	1204170350	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.0
485	PPAT	1403170511	0.06	–	–	6.8	0.06	–	–	10.0	0.06	–	NU	10.0
486	PPAT	1404012346	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.4	0.06	–	–	6.1
487	PPAT	1404030243	0.06	–	–	9.7	0.06	–	–	6.9	0.06	–	–	8.8
488	PUTR	1103061231	0.20	25	–	3.0	0.20	25	0.04	3.1	0.20	25	0.04	1.9
489	PUTR	140129NU1	0.20	25	0.04	2.5	0.20	25	0.04	2.5	0.20	25	0.04	3.2
490	PUTR	1404030243	0.20	25	–	2.8	0.20	25	–	2.8	0.20	25	–	2.9
491	SPAT	1404030243	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
492	SPAT	1405161708	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
493	TOCP	0203280456	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	NU	10.0
494	TOCO	1106201635	0.20	25	0.04	3.6	0.20	25	0.04	2.9	0.20	25	0.04	2.2
495	TOCO	1404012346	0.20	25	–	2.5	0.20	25	–	2.5	0.20	25	0.04	3.3
496	TOCO	1404030243	0.20	25	–	3.7	0.20	25	0.04	3.3	0.20	25	0.04	3.1
497	VALLE	1301302015	0.10	25	–	7.3	0.10	25	0.04	5.6	0.10	25	0.04	6.7
498	MAR	0306010252	0.10	25	–	8.7	0.10	25	–	6.8	0.10	25	–	10.0
499	MAR	0306201330	0.10	25	–	6.6	0.10	25	–	6.6	0.10	25	–	7.4
500	MAR	1203252237	0.10	25	–	5.4	0.10	25	–	10.0	0.10	25	–	5.0
501	MAR	1204170350	0.10	25	–	8.7	0.10	25	–	8.3	0.10	25	0.04	8.1
502	MAR	1210111722	0.10	25	–	3.6	0.10	25	–	5.2	0.10	25	0.04	7.4
503	MAR	1408232232	0.10	25	–	10.0	0.10	25	–	9.1	0.10	25	0.04	5.9
504	MAR	9810NU412	0.10	25	–	6.8	0.10	25	–	7.2	0.10	25	–	7.1
505	CO03	1509162254	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.1	0.06	–	NU	10.0
506	GO04	1509162254	0.06	–	–	8.6	0.06	–	–	7.9	0.06	–	–	9.7
507	LCO	1509162254	0.20	–	–	3.5	0.20	–	–	3.0	0.20	–	–	3.1
508	MT01	1509162254	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.3

Tabla A.3: — Continuación.

#	Registro		Canal 1				Canal 2				Canal 3			
	Estación	Evento	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]
509	MT05	1509162254	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
510	MT09	1509162254	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
511	VA01	1509162254	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.5	0.06	–	–	9.1
512	VA03	1509162254	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
513	VA05	1509162254	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.5	0.06	–	–	10.0
514	AC04	1509162254	0.06	–	–	7.2	0.06	–	–	6.9	0.06	–	–	9.1
515	AP01	1503230451	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
516	C01O	1508232310	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
517	C01O	1509162254	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.8	0.06	–	–	8.9
518	C09O	1509162254	0.06	–	–	9.4	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.2
519	C11O	1509162254	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.7	0.06	–	–	10.0
520	CO02	1509260251	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
521	CO03	1509162318	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	NU	8.4
522	CO03	1509170141	0.06	–	–	9.7	0.06	–	–	10.0	0.06	–	NU	8.5
523	CO03	1509170355	0.06	–	–	8.5	0.06	–	–	9.2	0.06	–	NU	9.3
524	CO03	1509170410	0.06	–	–	8.8	0.06	–	–	10.0	0.06	–	NU	8.5
525	CO03	1509211739	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.6	0.06	–	–	9.6
526	CO03	1509220712	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	NU	10.0
527	CO03	1509260251	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	NU	10.0
528	GO01	14NU70509	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
529	GO04	1508232310	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
530	GO04	1509162318	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
531	GO04	1509170141	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
532	GO04	1509170410	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
533	GO04	1509211739	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
534	GO04	1509260251	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
535	LMEL	1509162254	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
536	MNM CX	1503230451	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
537	MT05	1509162318	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.7
538	MT05	1509170410	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.3	0.06	–	–	8.2

Tabla A.3: — Continuación.

#	Registro		Canal 1				Canal 2				Canal 3			
	Estación	Evento	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]	$f_1^{[a]}$ [Hz]	$f_2^{[b]}$ [Hz]	$T_c^{[c]}$ [s]	$T_l^{[d]}$ [s]
539	MT09	1509162318	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
540	PB11	14NU70509	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
541	PB16	1503230451	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
542	ROBL	1509162254	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	6.4
543	ROBL	1509162318	0.06	–	–	9.2	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.7
544	ROBL	1509170410	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
545	V01A	1509162254	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	7.2	0.06	–	–	9.1
546	V02A	1509162254	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.0	0.06	–	–	9.0
547	V09A	1509162254	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.8	0.06	–	–	9.2
548	VA01	1509162316	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.9	0.06	–	–	9.3
549	VA01	1509162318	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.9	0.06	–	–	9.2
550	VA03	1509162318	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0
551	VA03	1509170410	0.06	–	–	8.1	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	7.7
552	VA03	1509211739	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	8.3
553	VA05	1509162318	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	10.0	0.06	–	–	9.9

[a]: Frecuencia de esquina utilizada en filtro acausal *butterworth* pasa alto de orden 4.

[b]: Frecuencia de esquina utilizada en filtro acausal *butterworth* pasa bajo de orden 4, en caso que corresponda.

[c]: Límite de periodo corto para utilizar el espectro de respuesta de aceleración a 5% de amortiguamiento. Si no se indica número, no existe limitación de periodo corto. En el caso de existir limitación, este valor es válido para el estudio de razones espectrales H/V del Capítulo 5, mientras que para las curvas de atenuación el registro no se utiliza. NU: indica que el registro no se utiliza en su totalidad.

[d]: Límite de periodo largo para utilizar el espectro de respuesta de aceleración a 5% de amortiguamiento.

Apéndice B

Factores de amplificación para las estaciones sísmicas utilizadas

B.1. Razones espectrales H/V de estaciones sísmicas

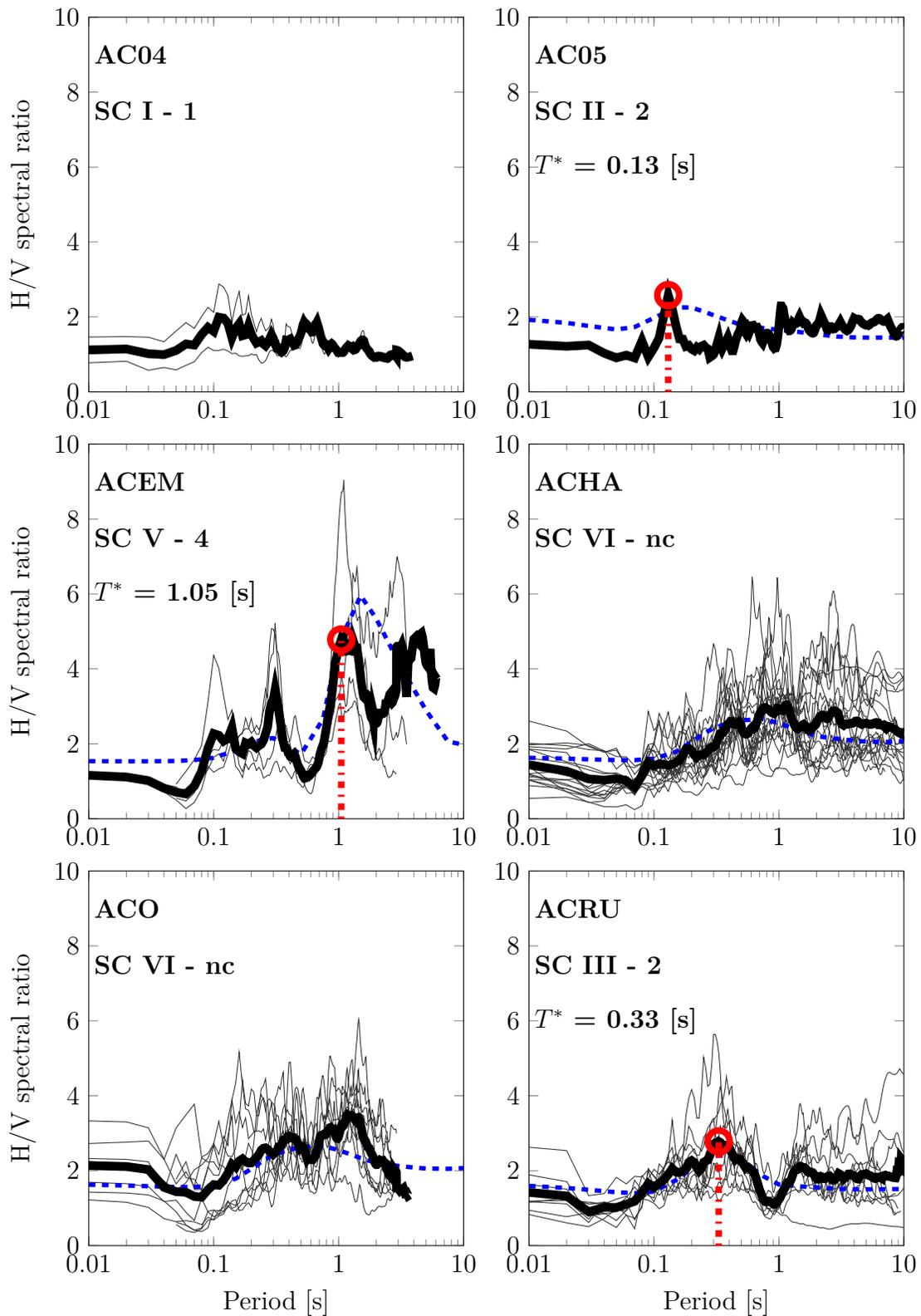


Figura B.1: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

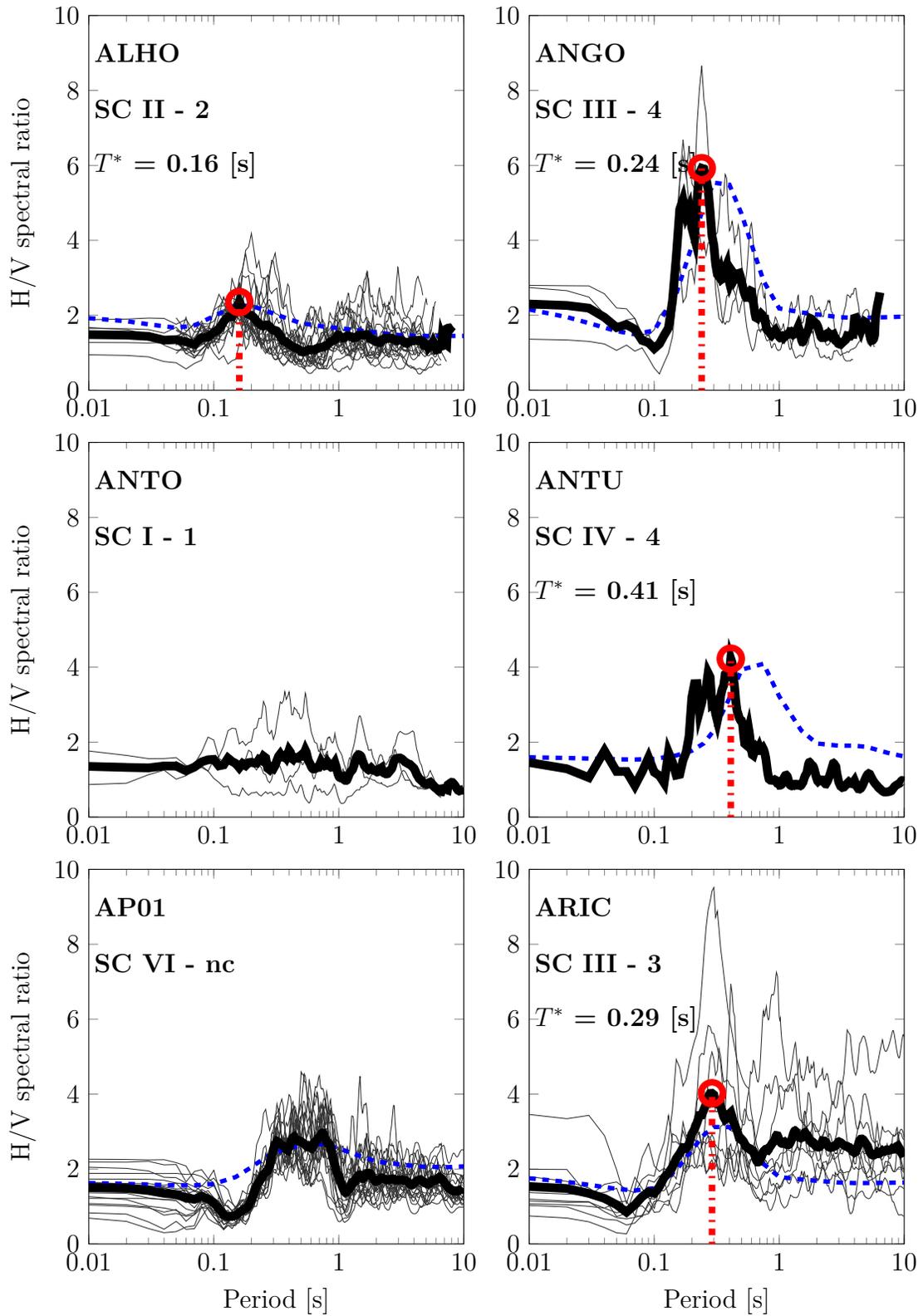


Figura B.2: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

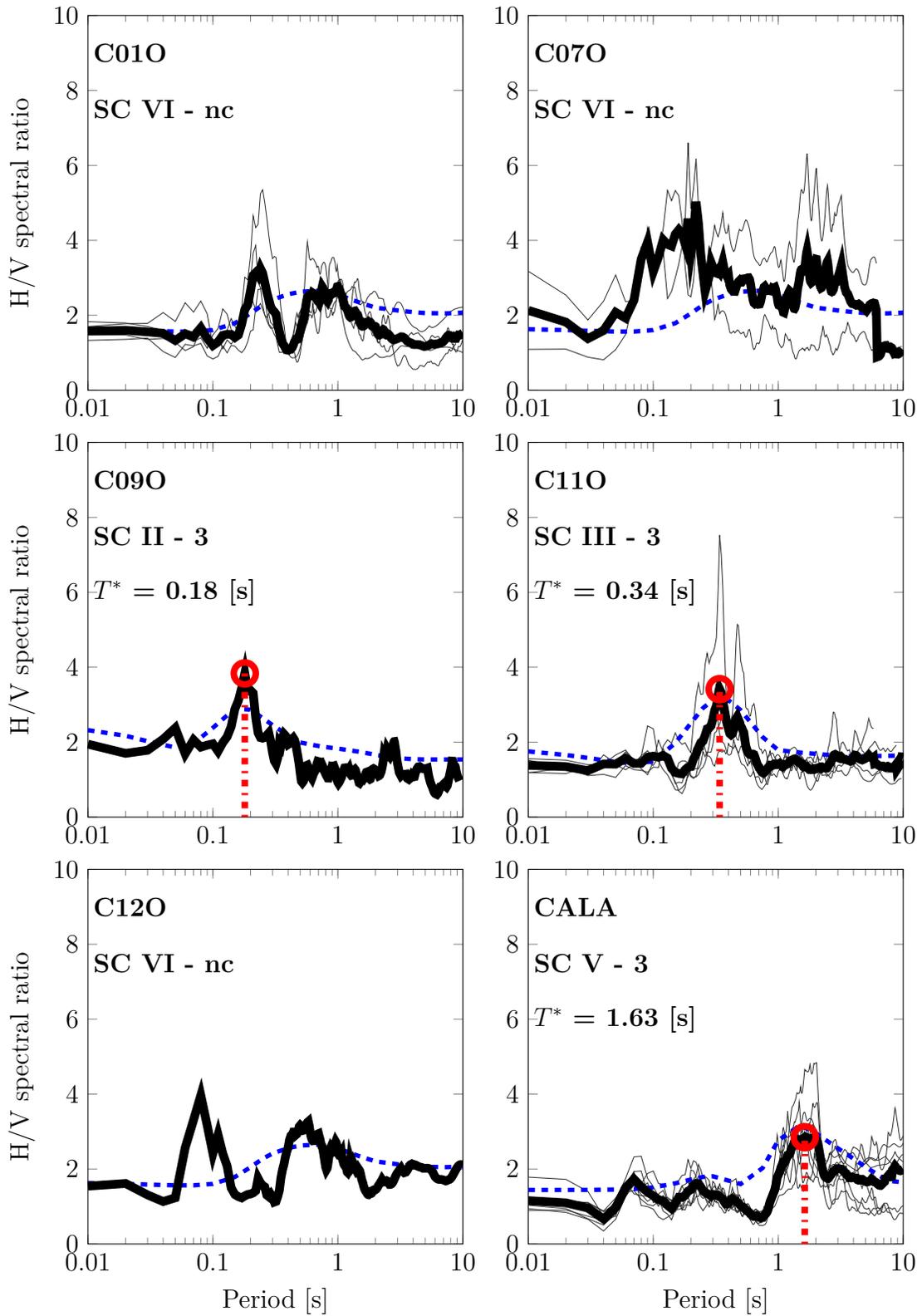


Figura B.3: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

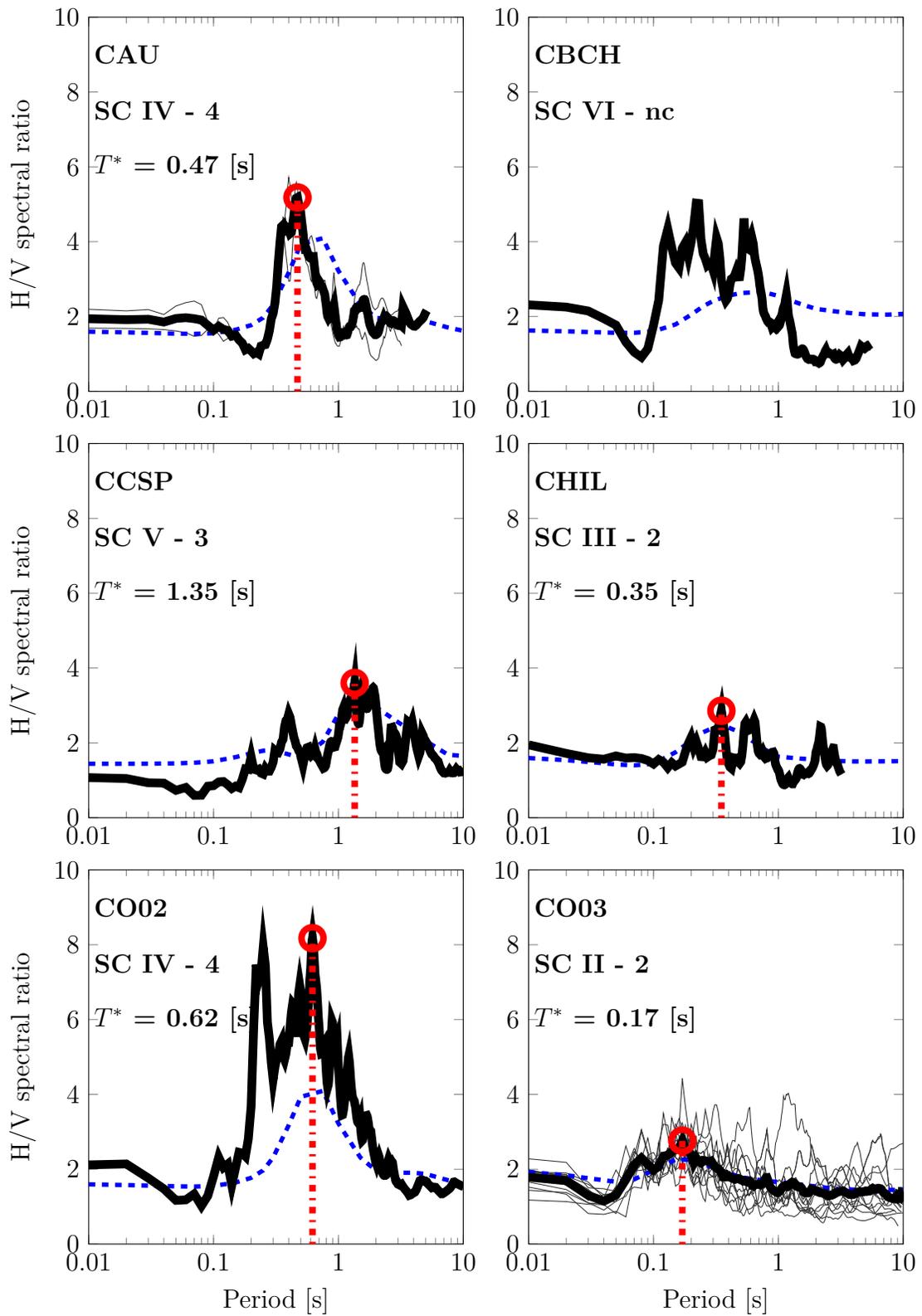


Figura B.4: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

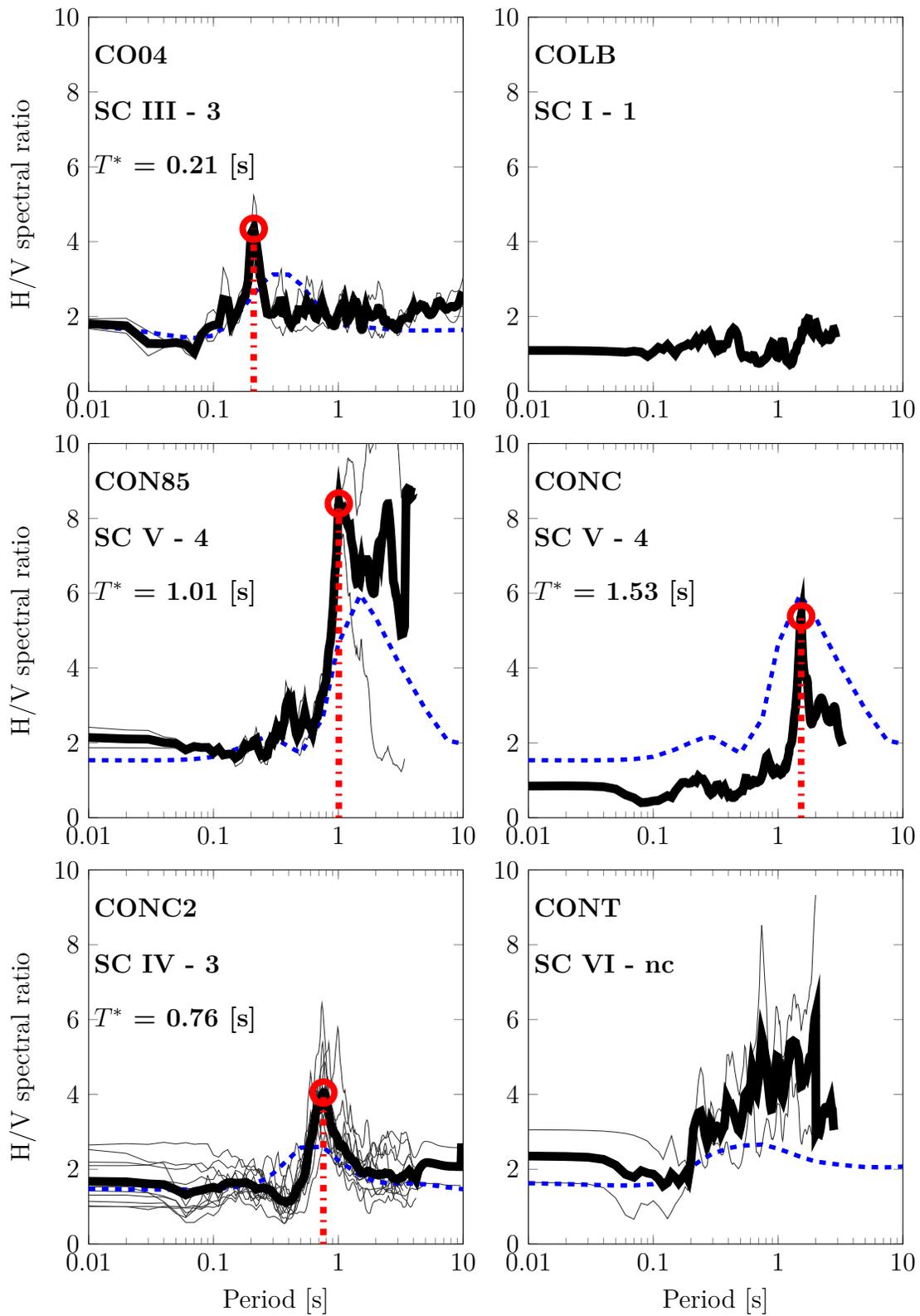


Figura B.5: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

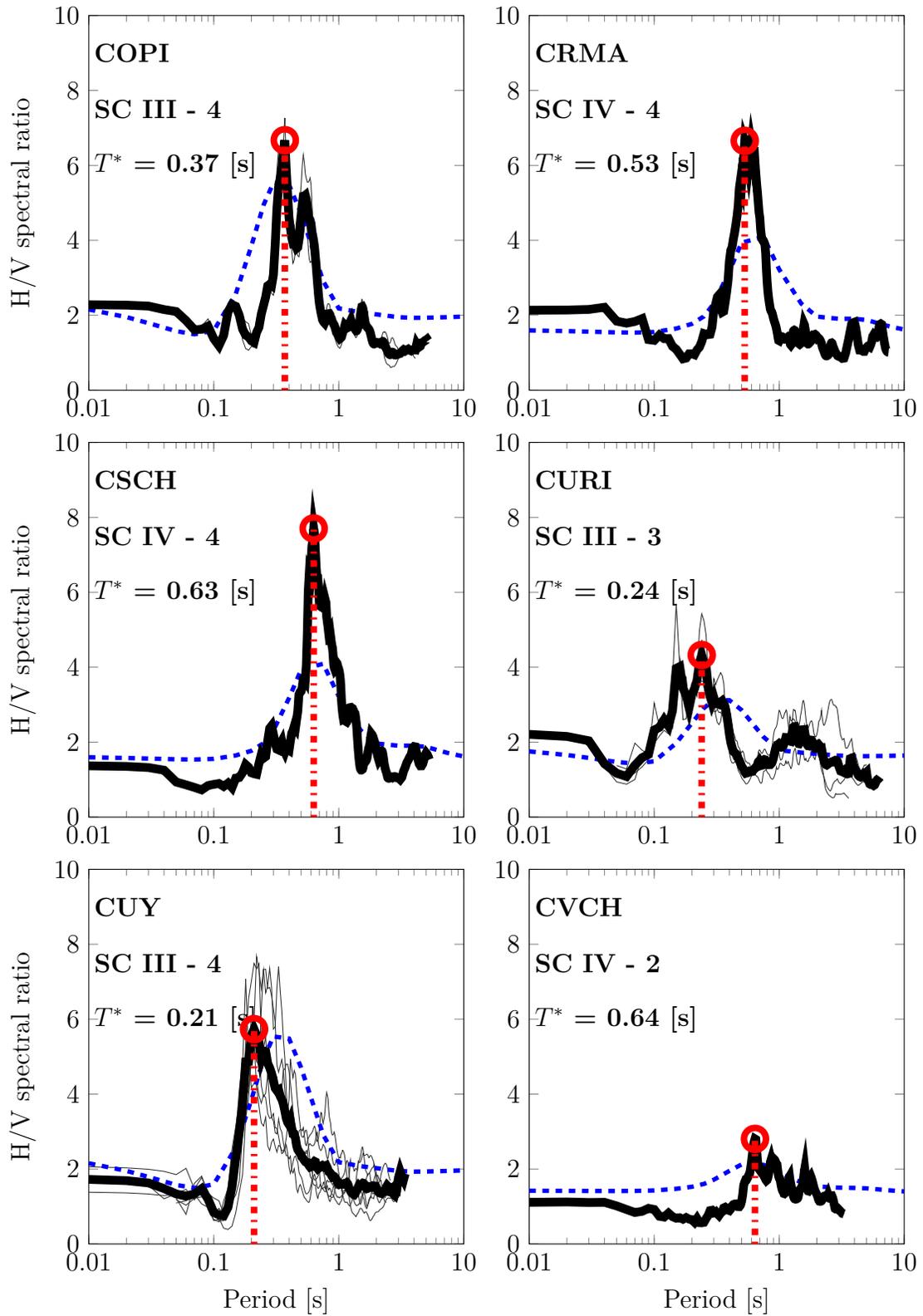


Figura B.6: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

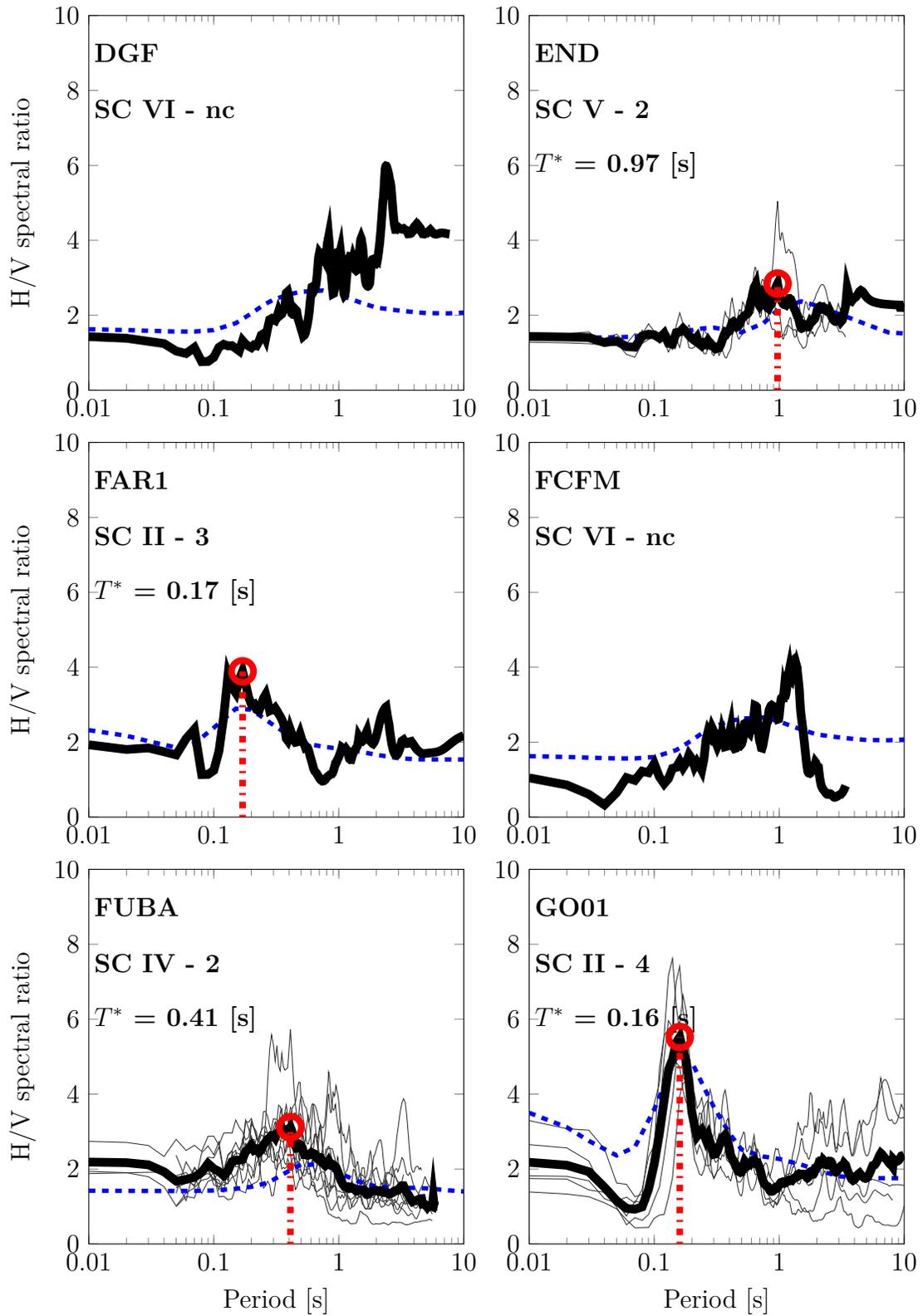


Figura B.7: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

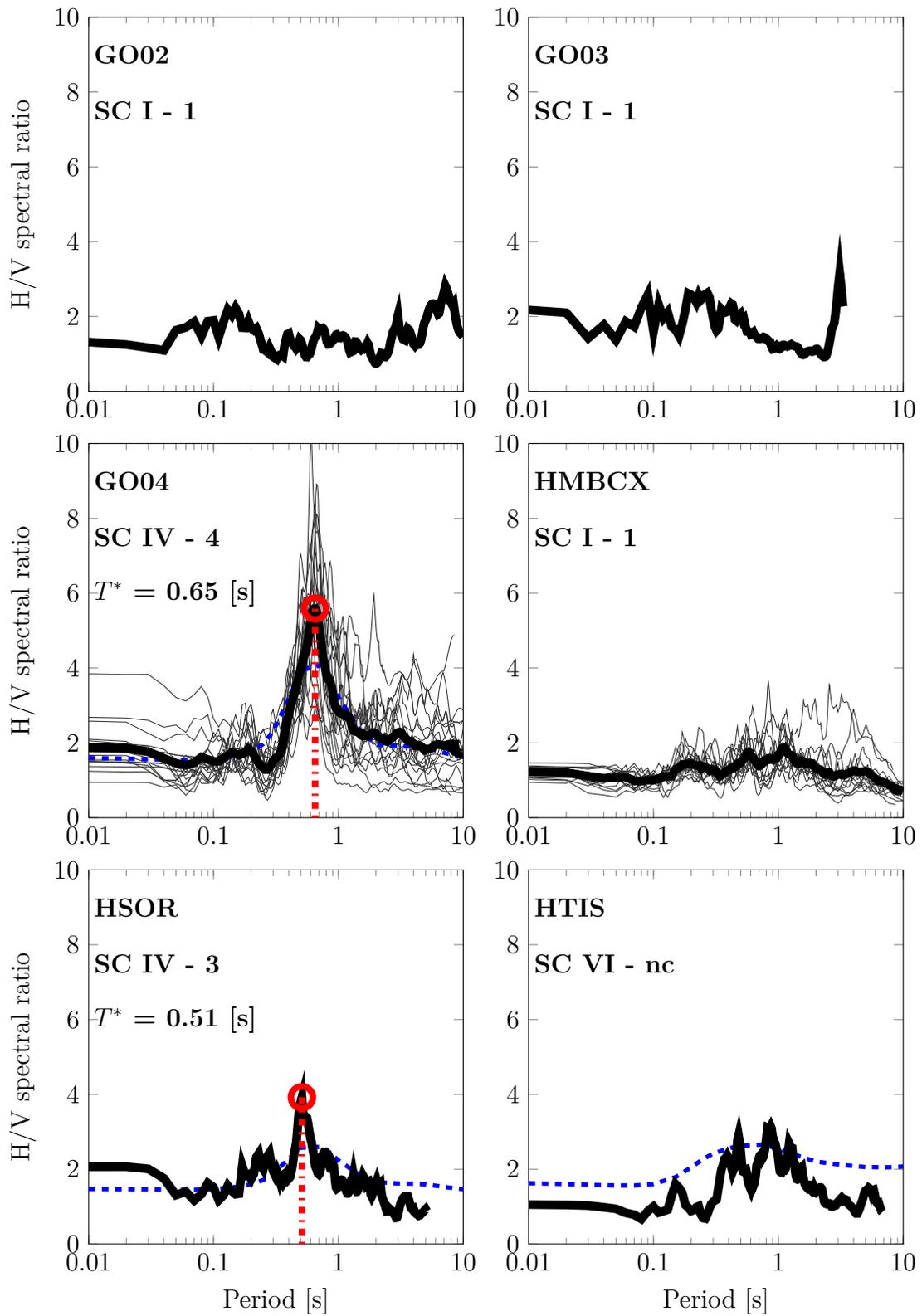


Figura B.8: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

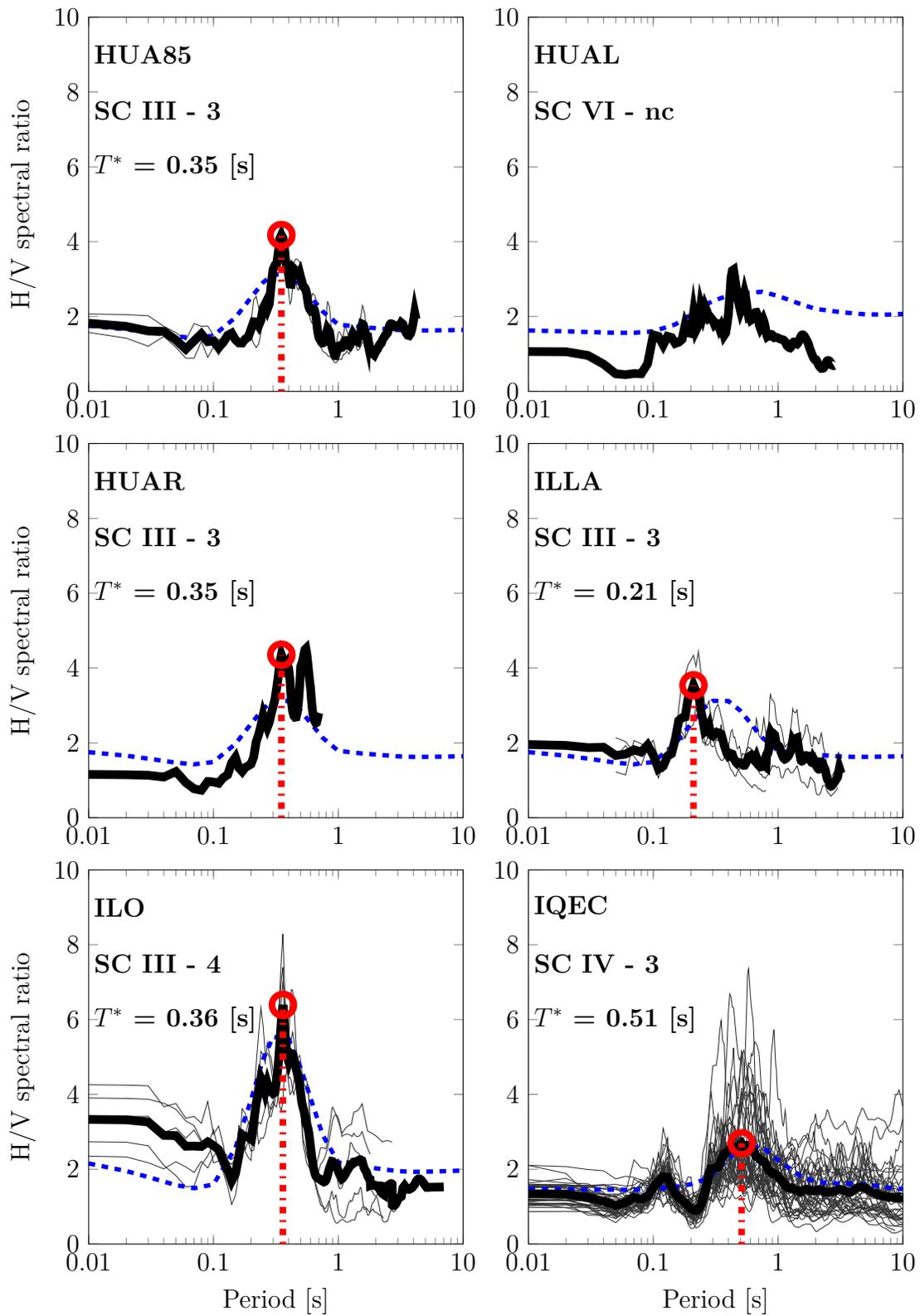


Figura B.9: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

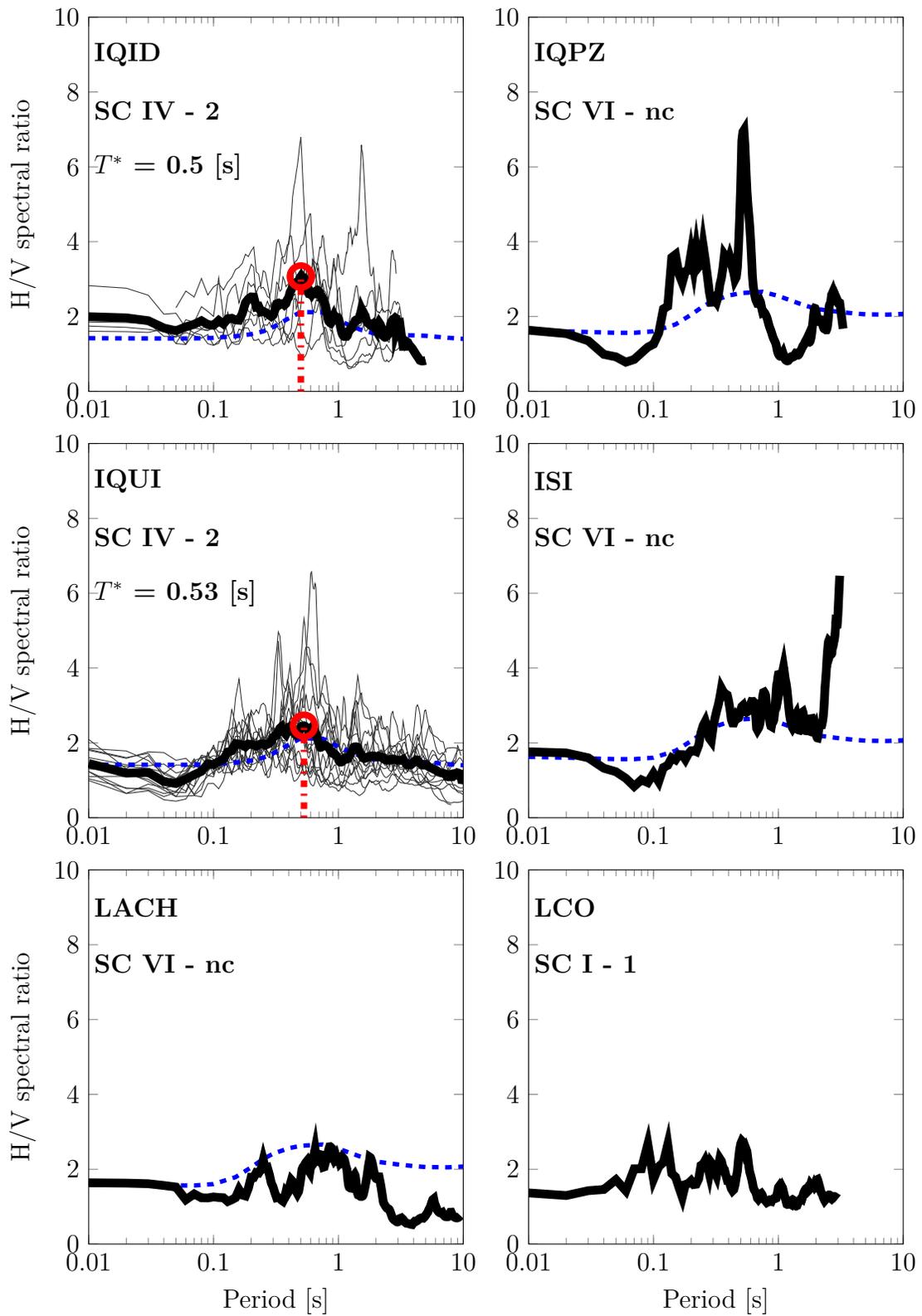


Figura B.10: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

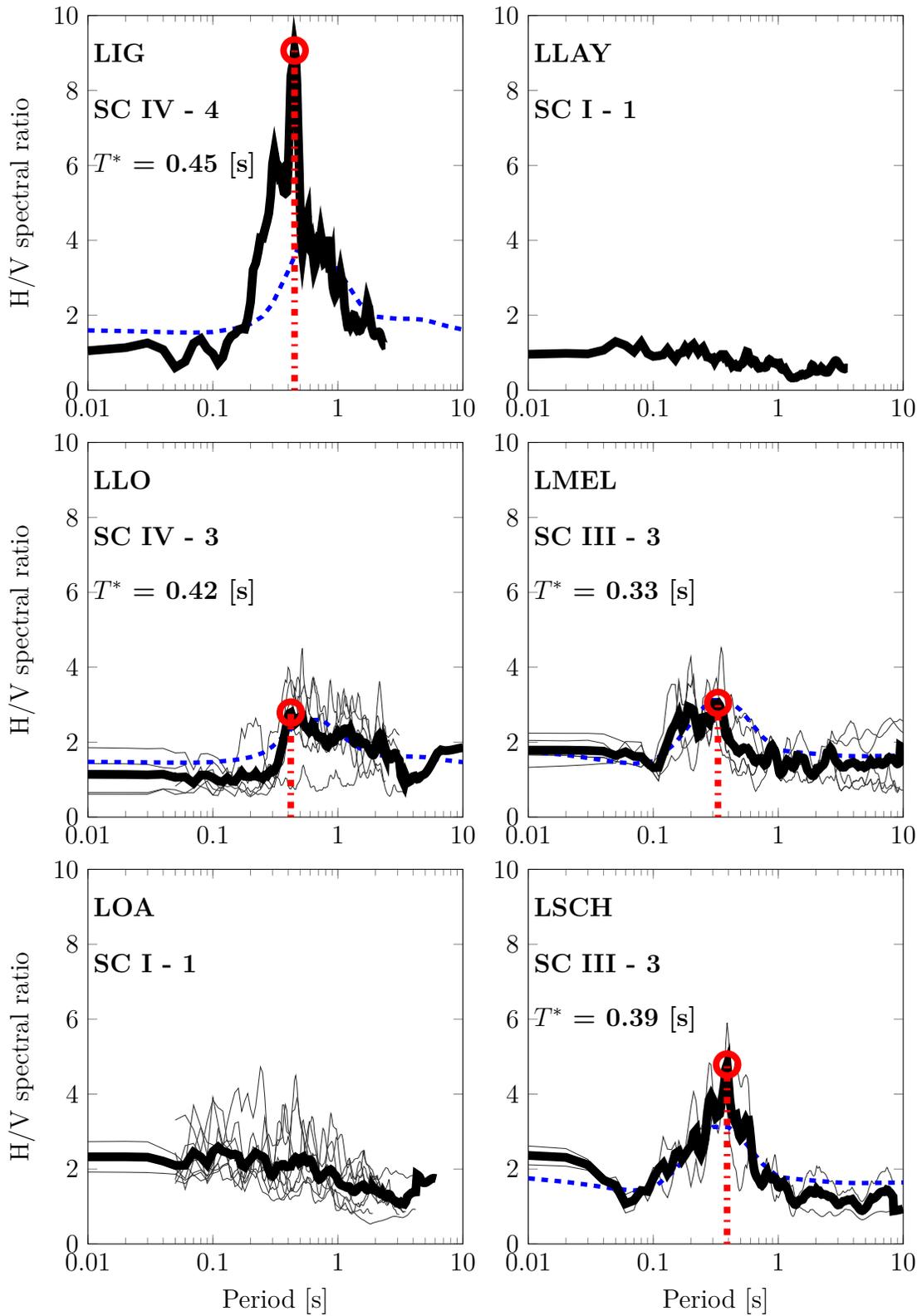


Figura B.11: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

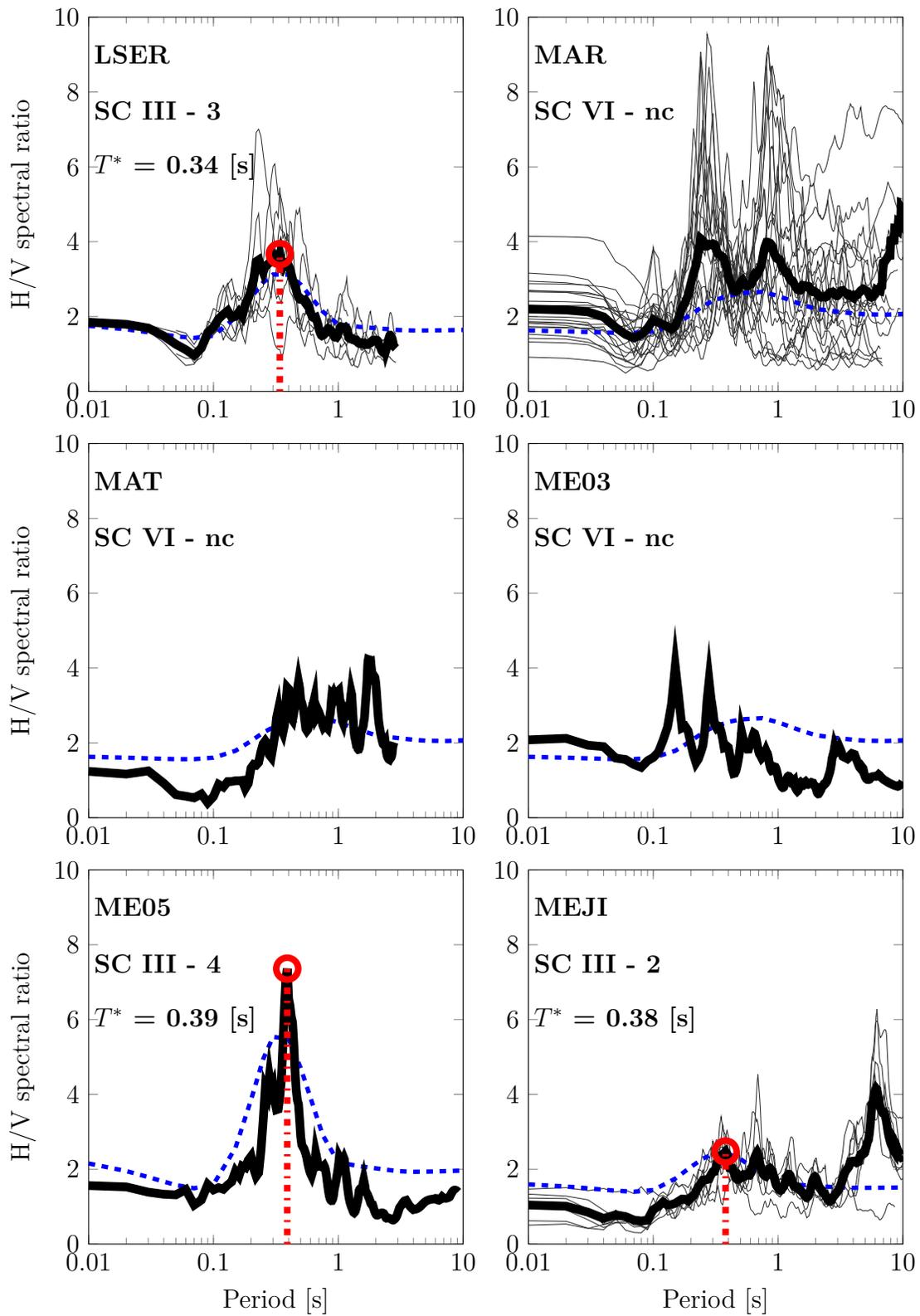


Figura B.12: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

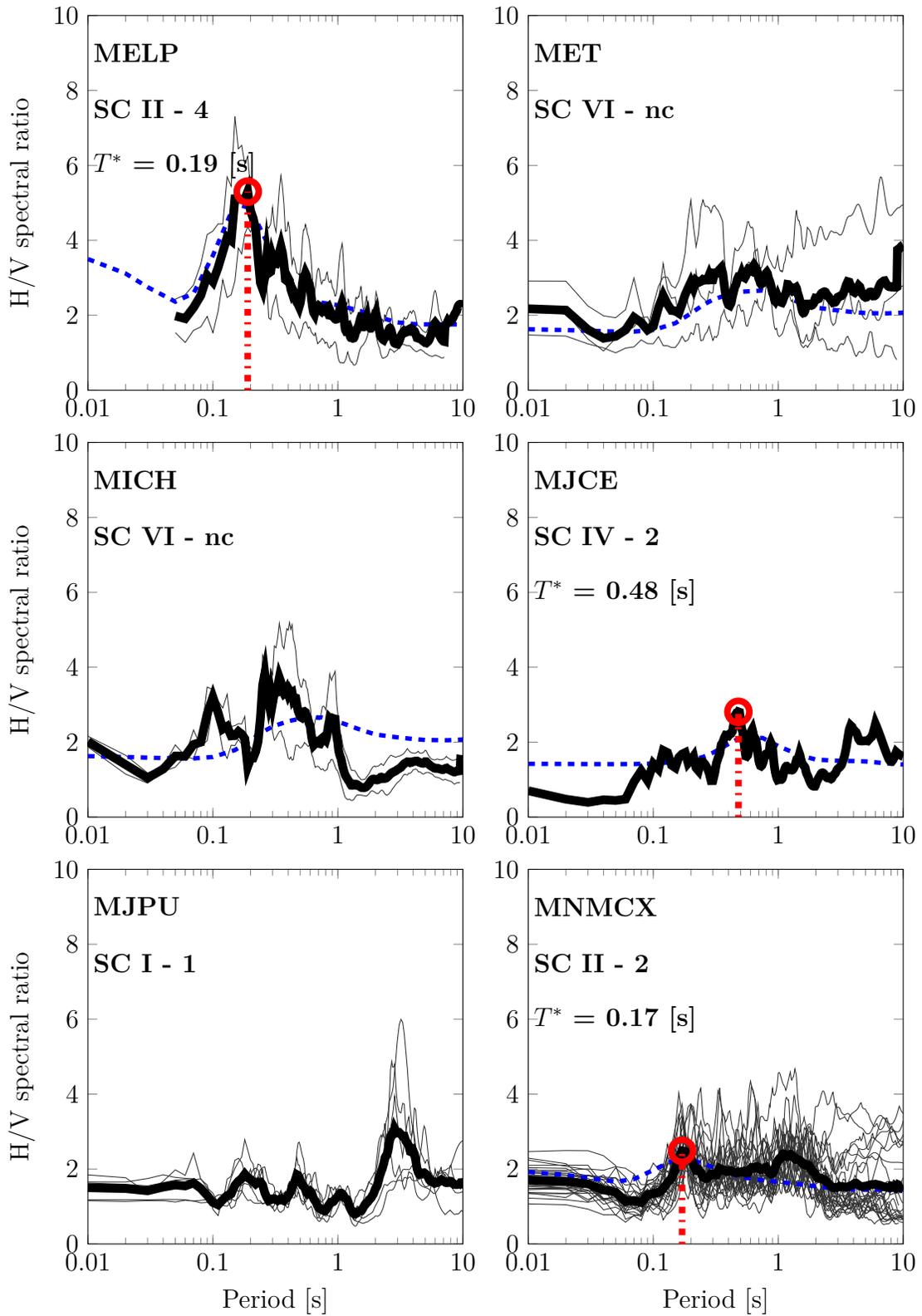


Figura B.13: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

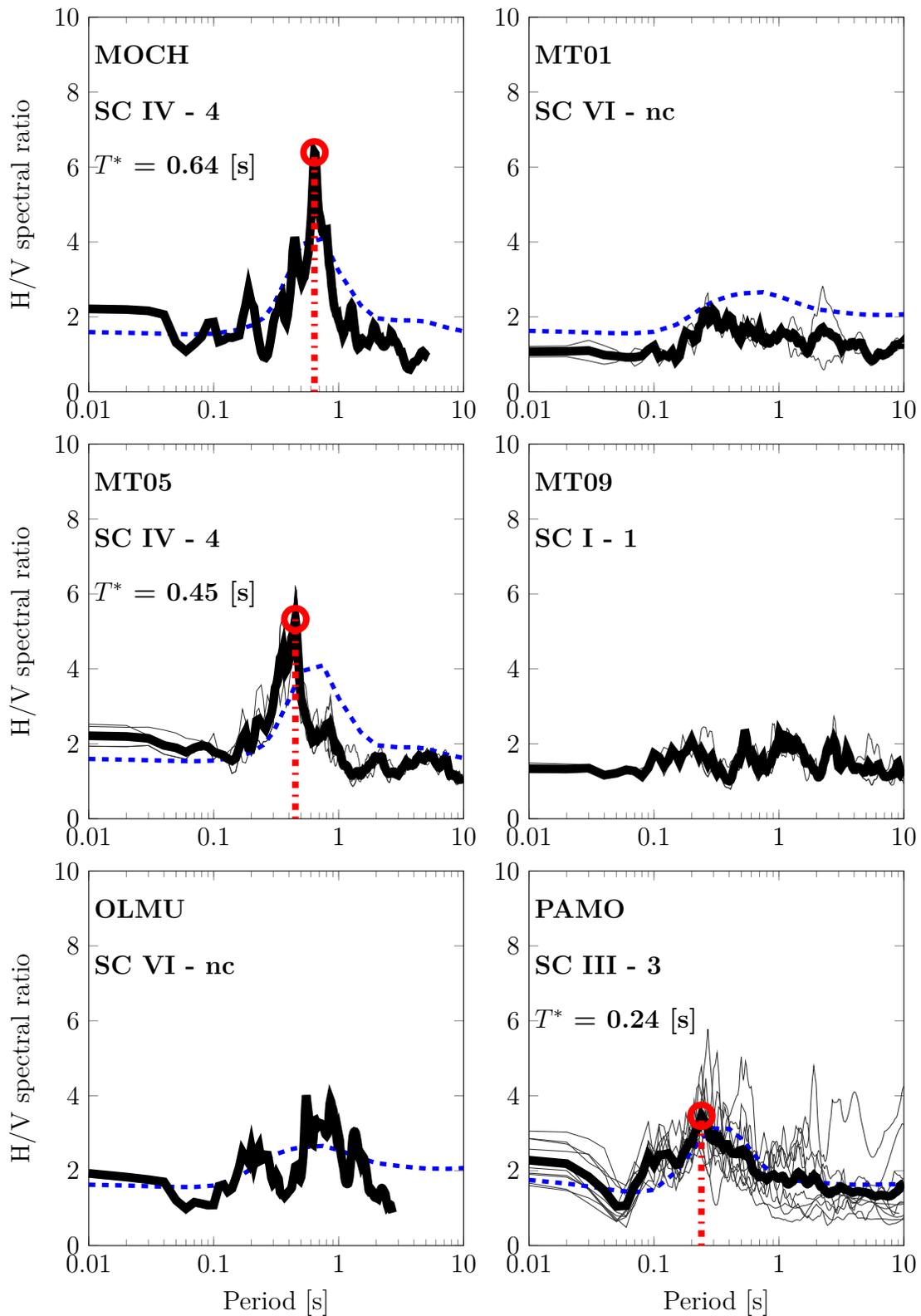


Figura B.14: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

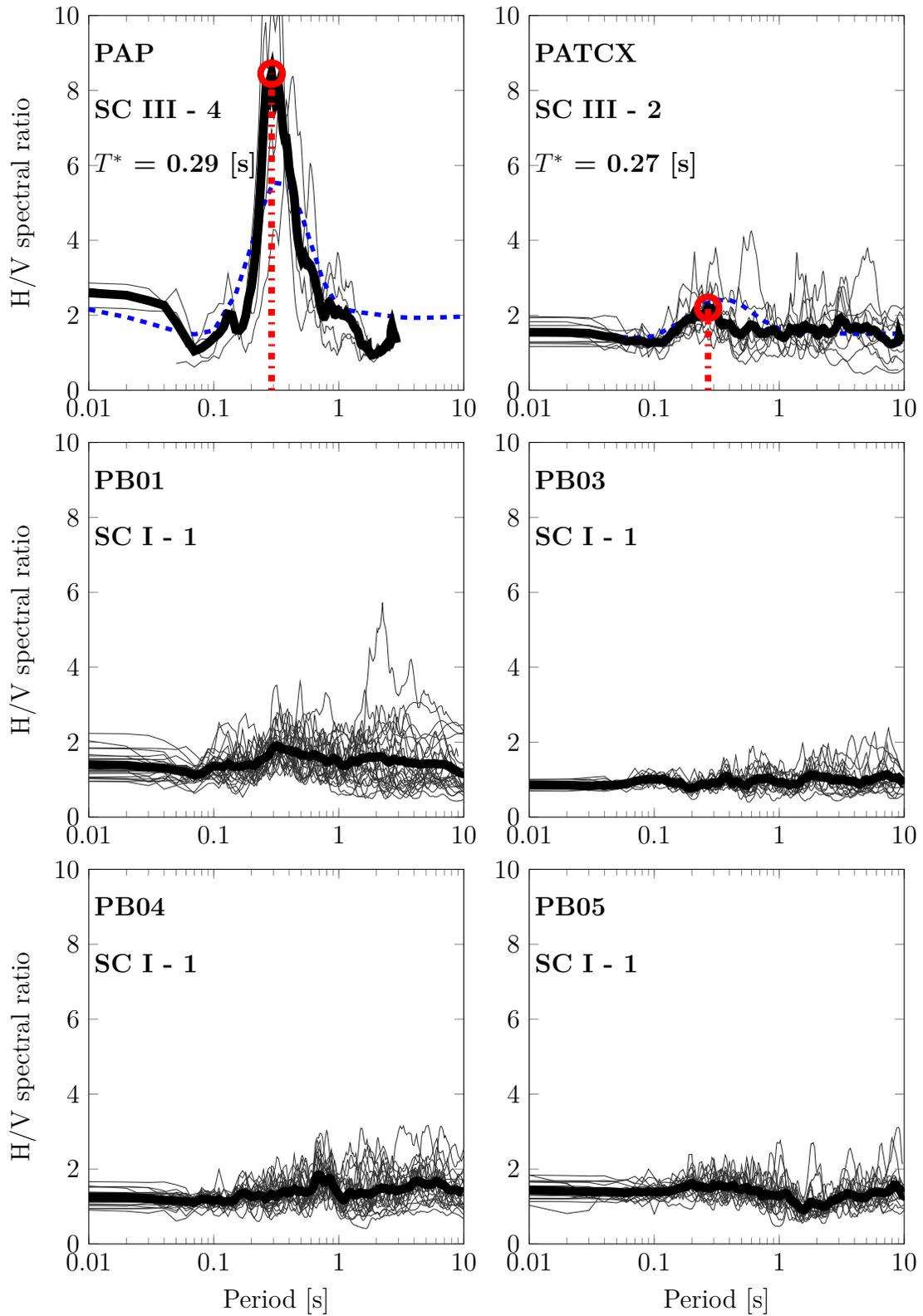


Figura B.15: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

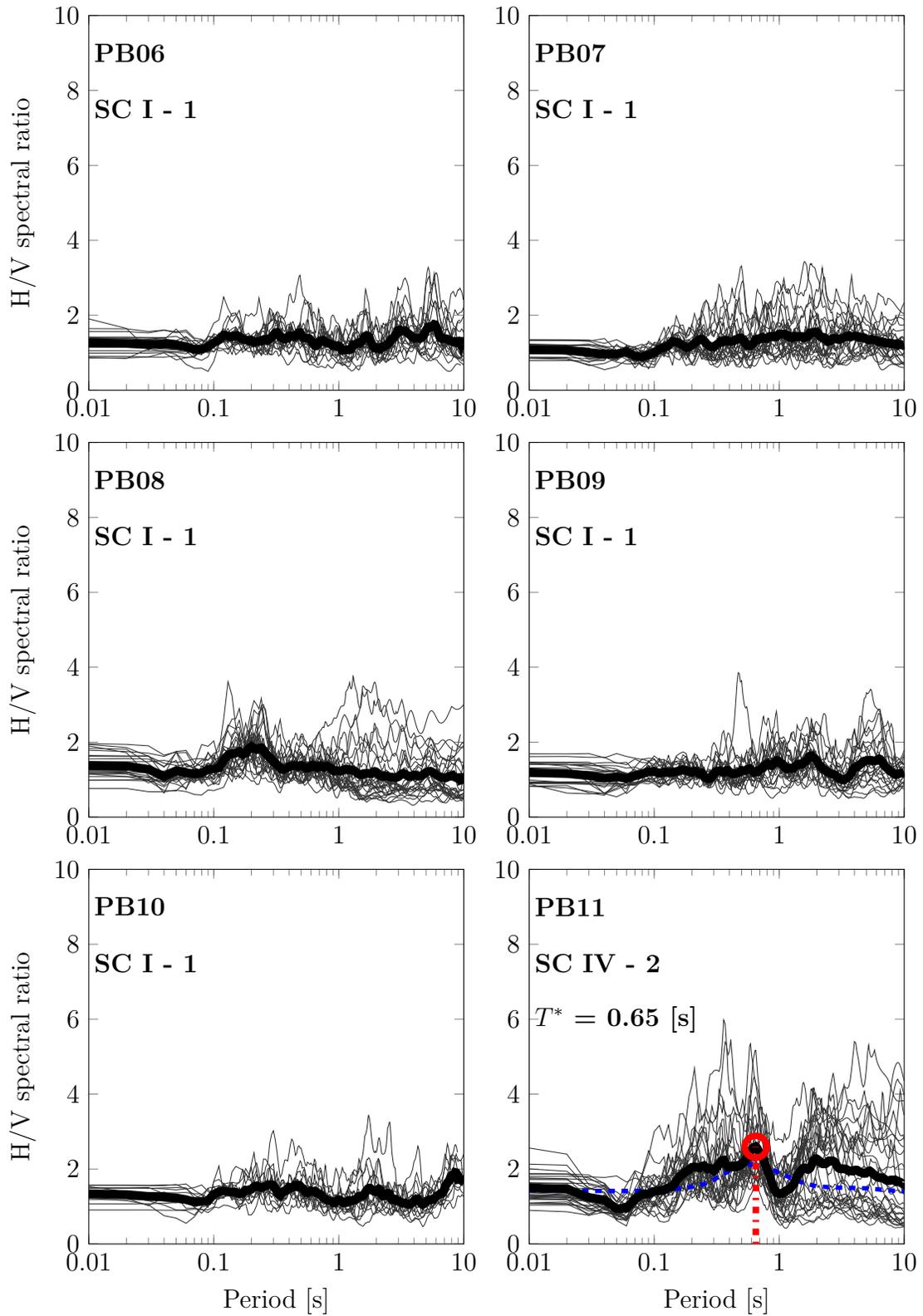


Figura B.16: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

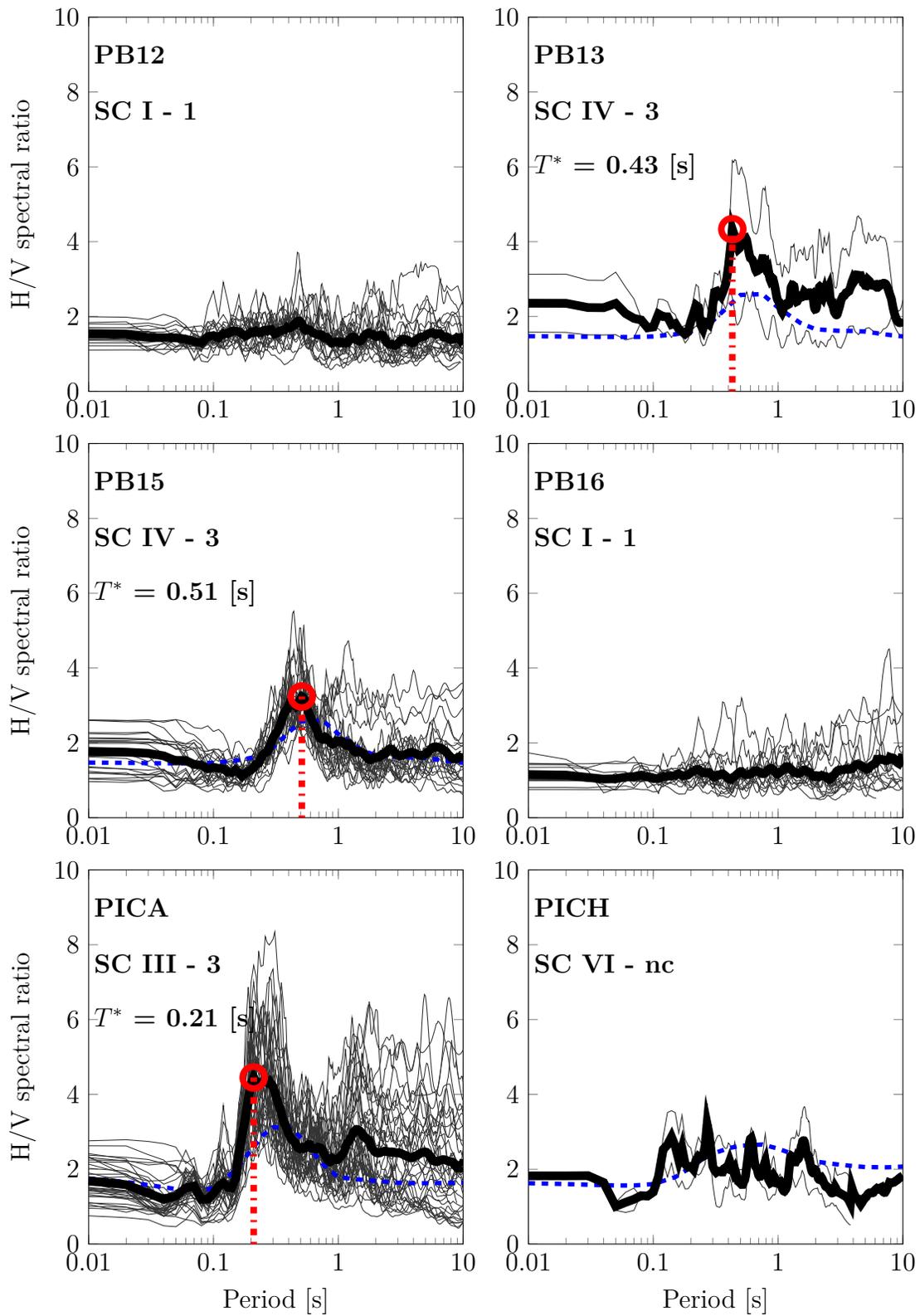


Figura B.17: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

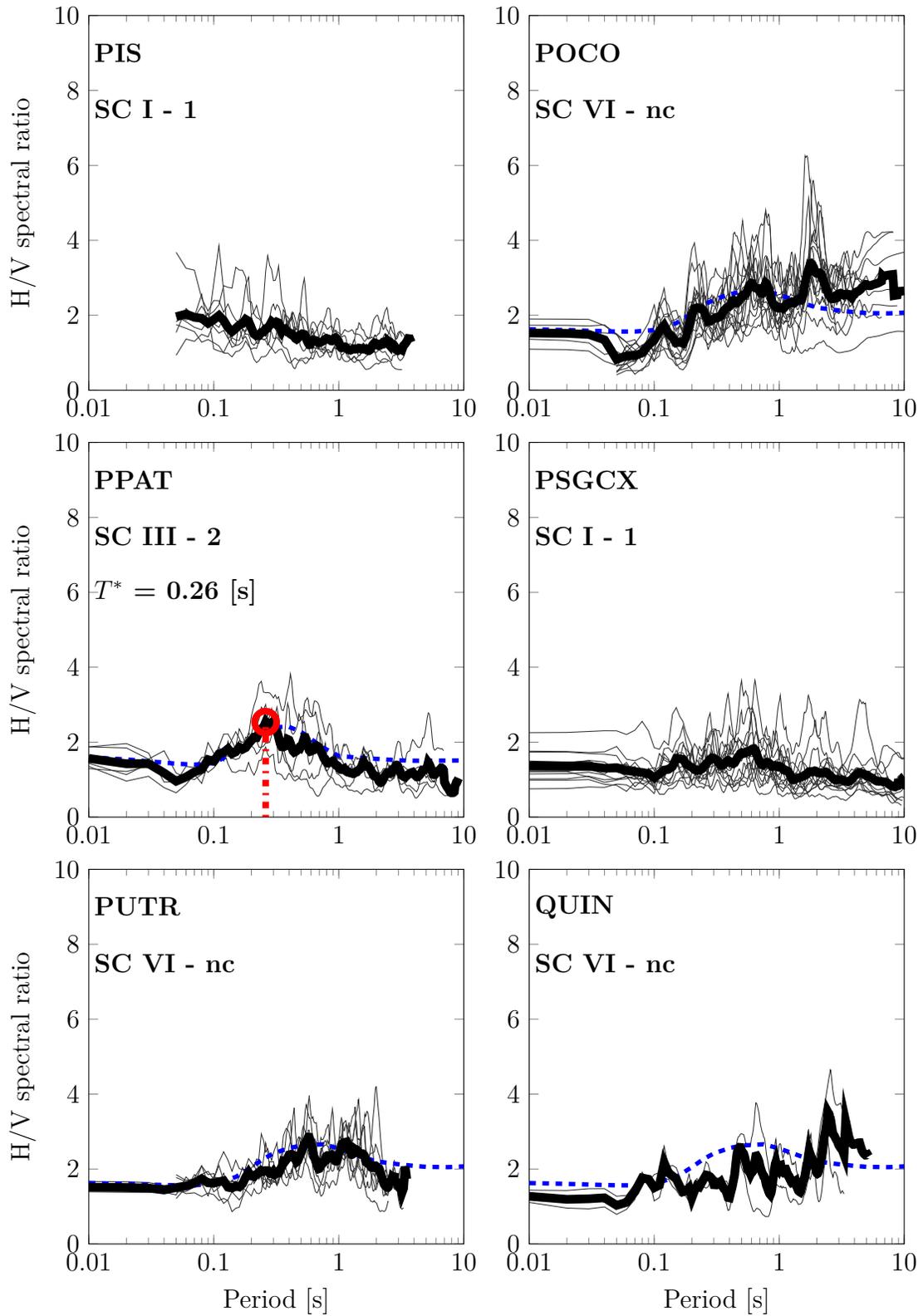


Figura B.18: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

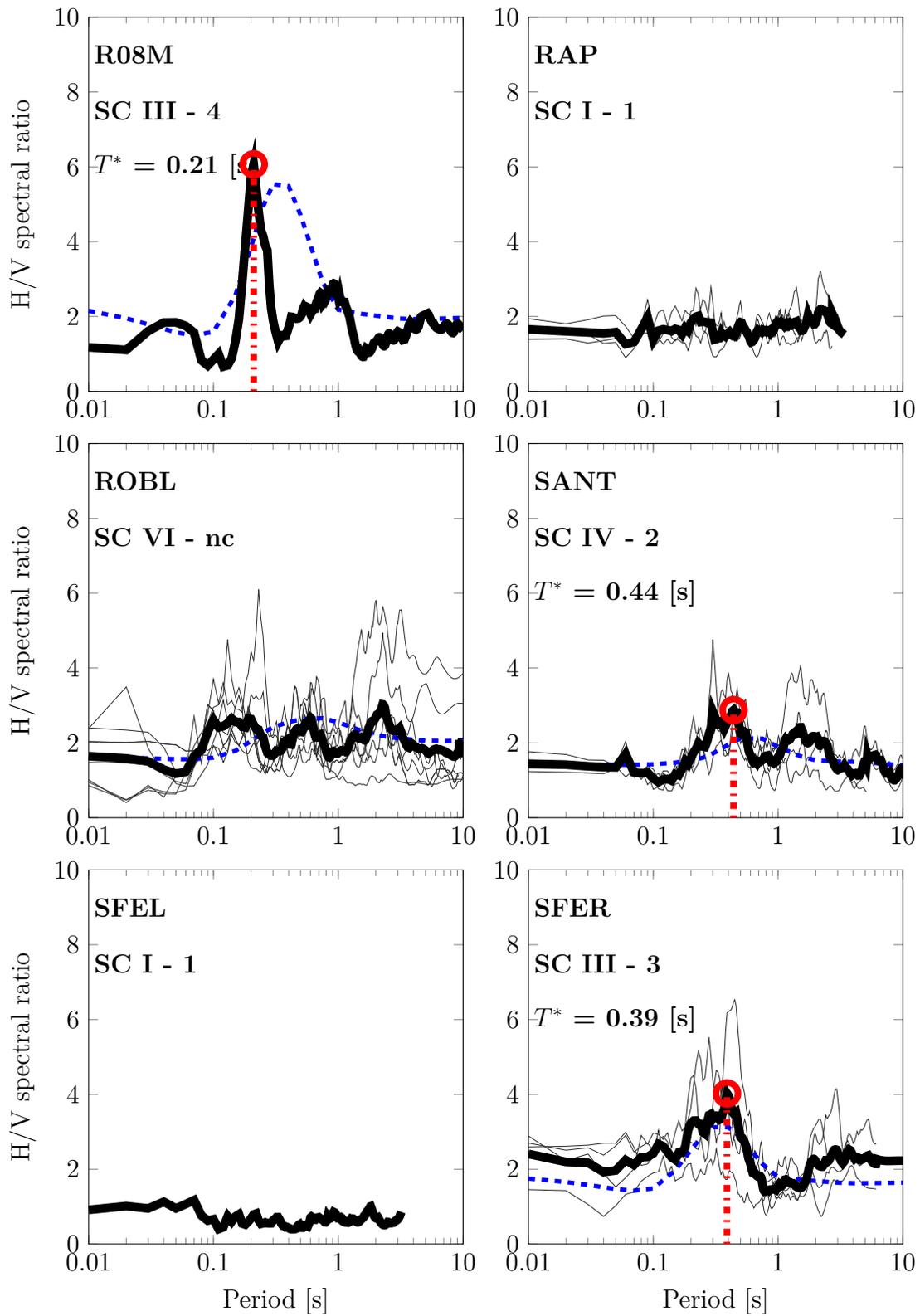


Figura B.19: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

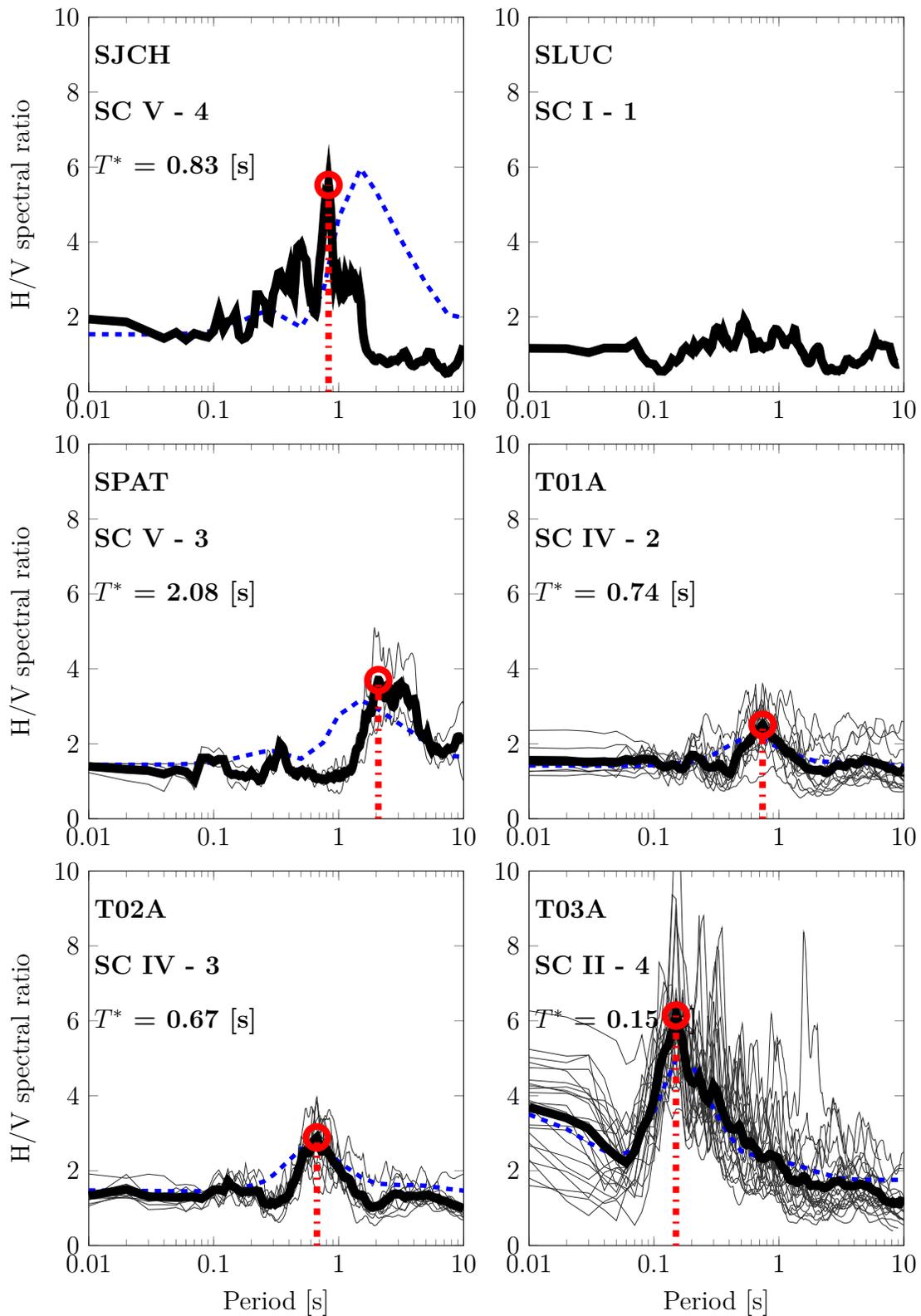


Figura B.20: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

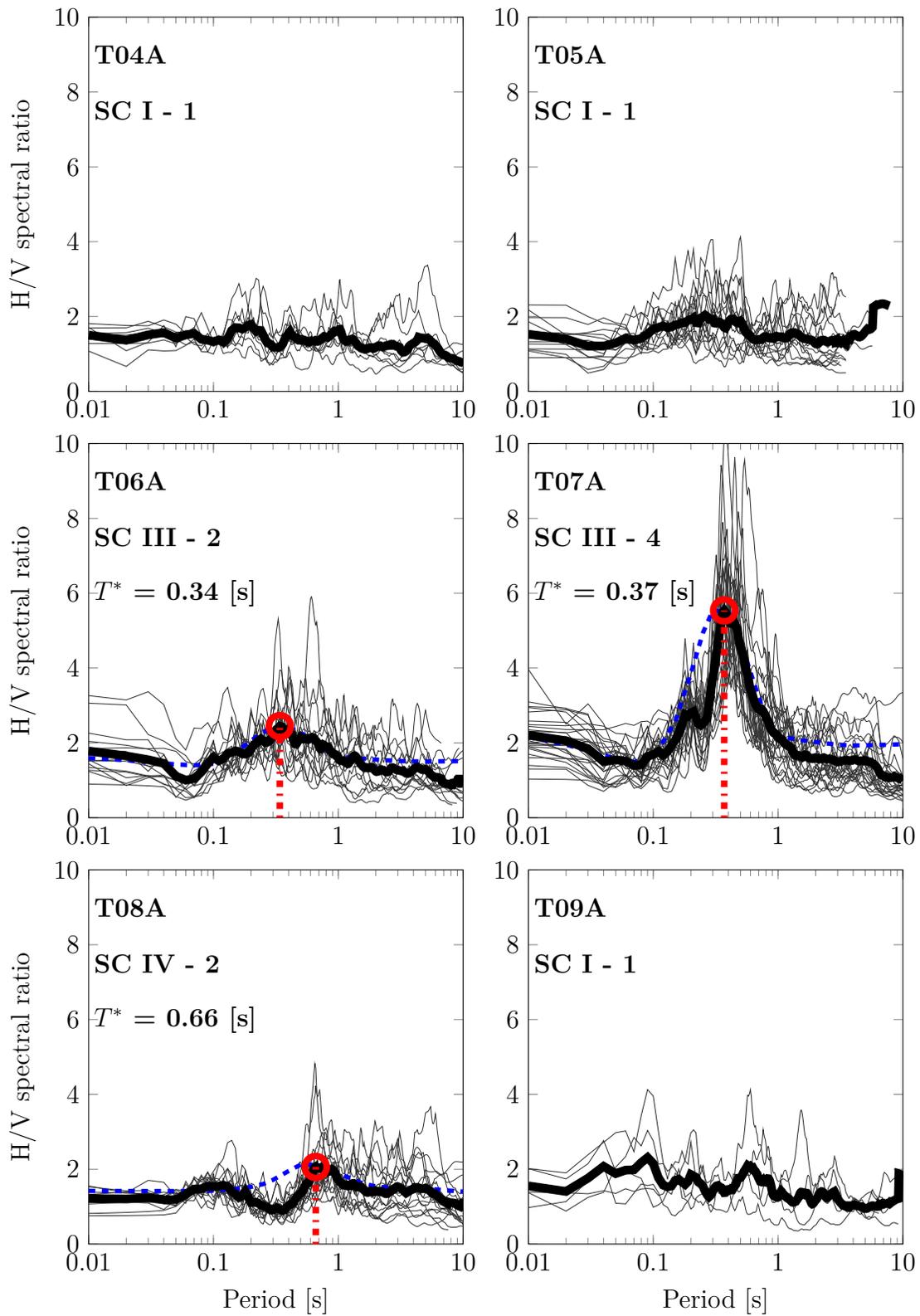


Figura B.21: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

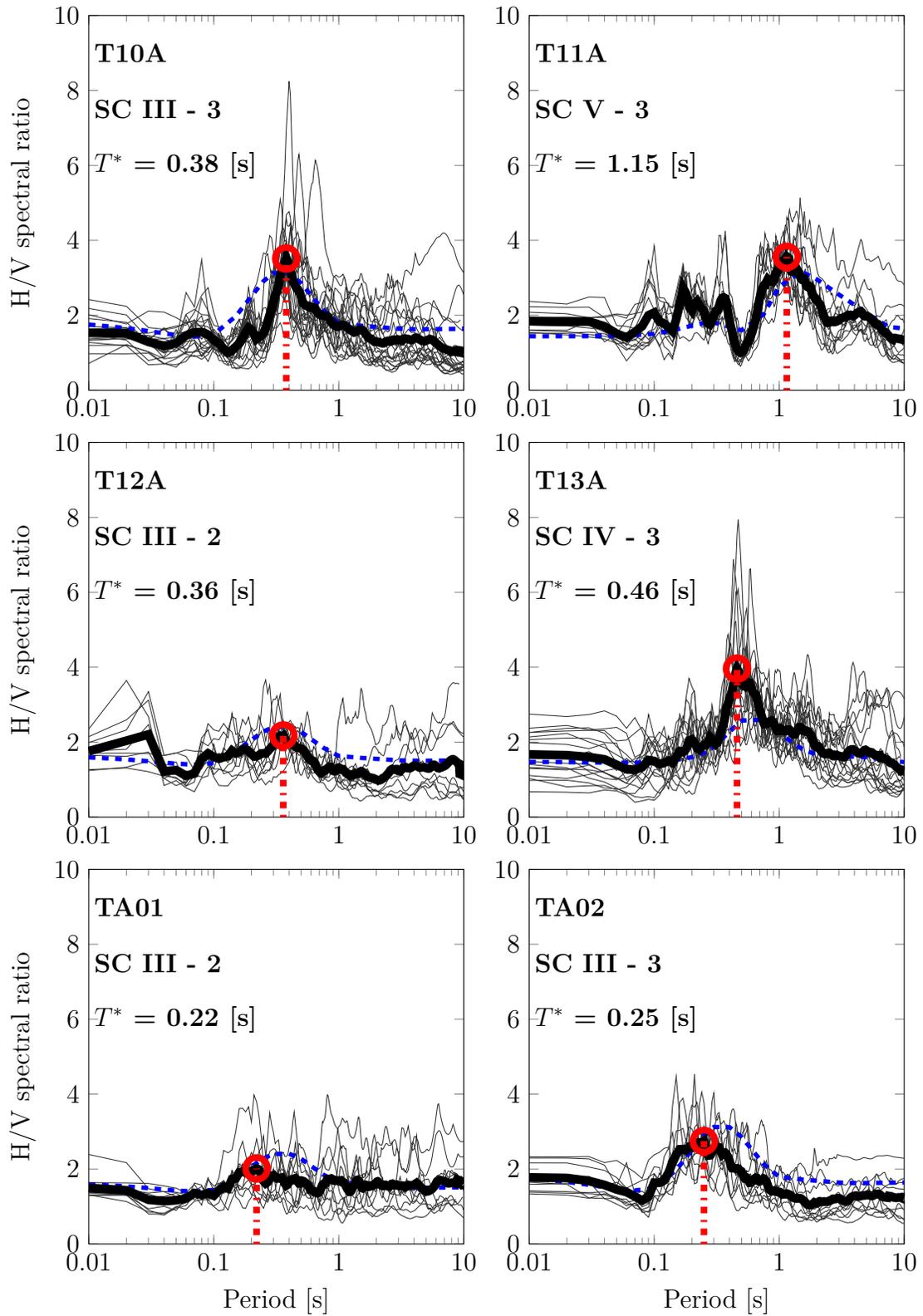


Figura B.22: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

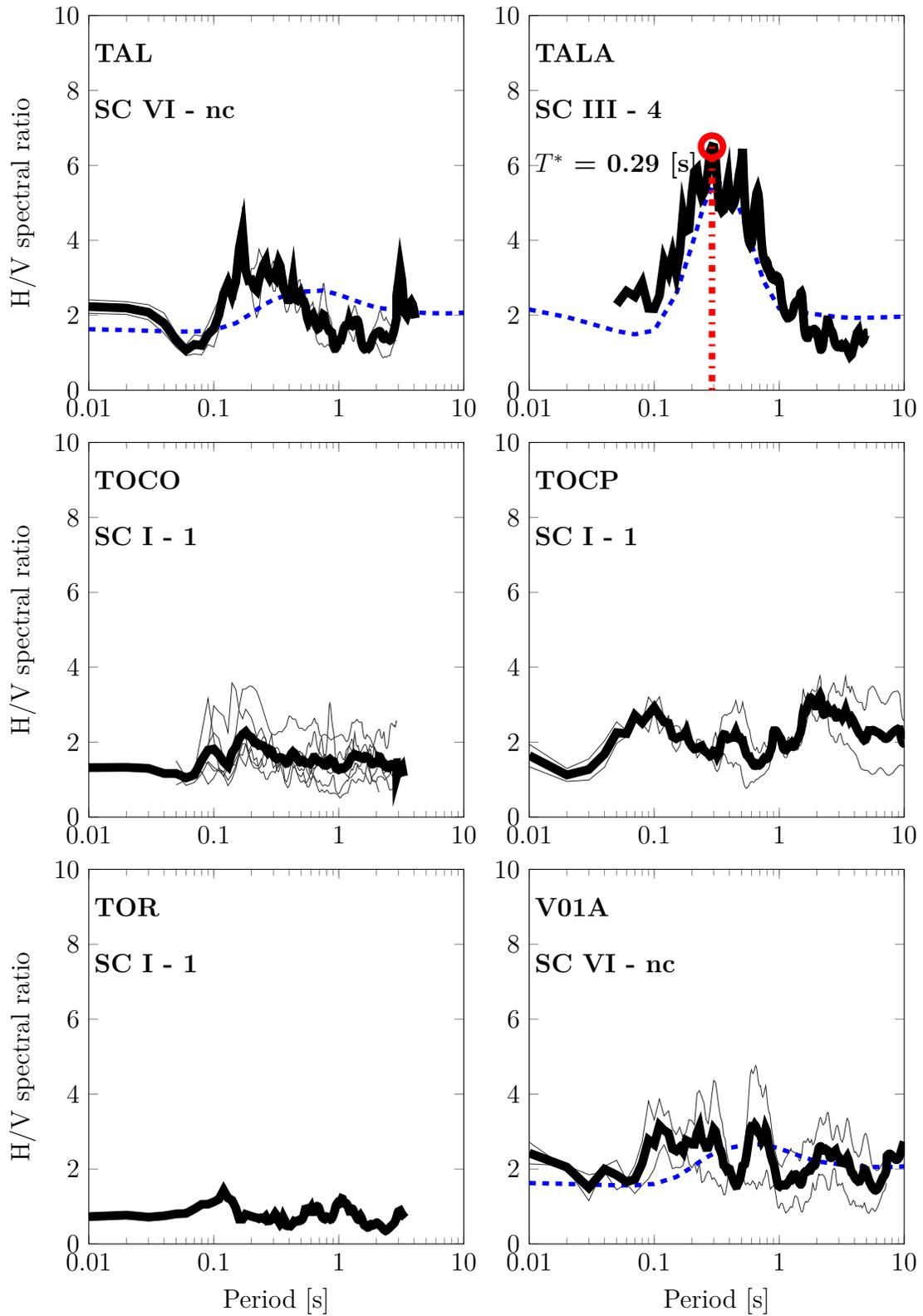


Figura B.23: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

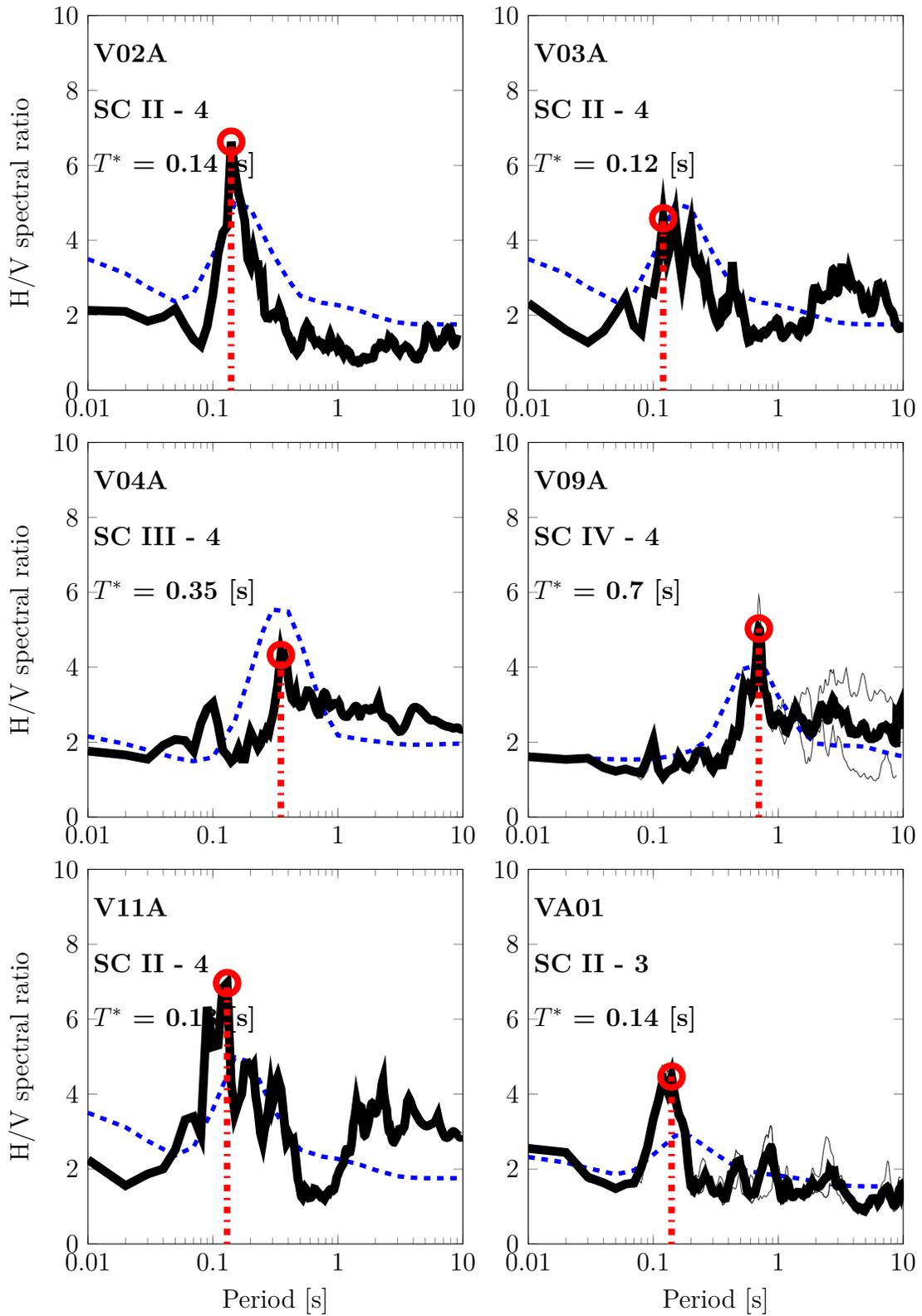


Figura B.24: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

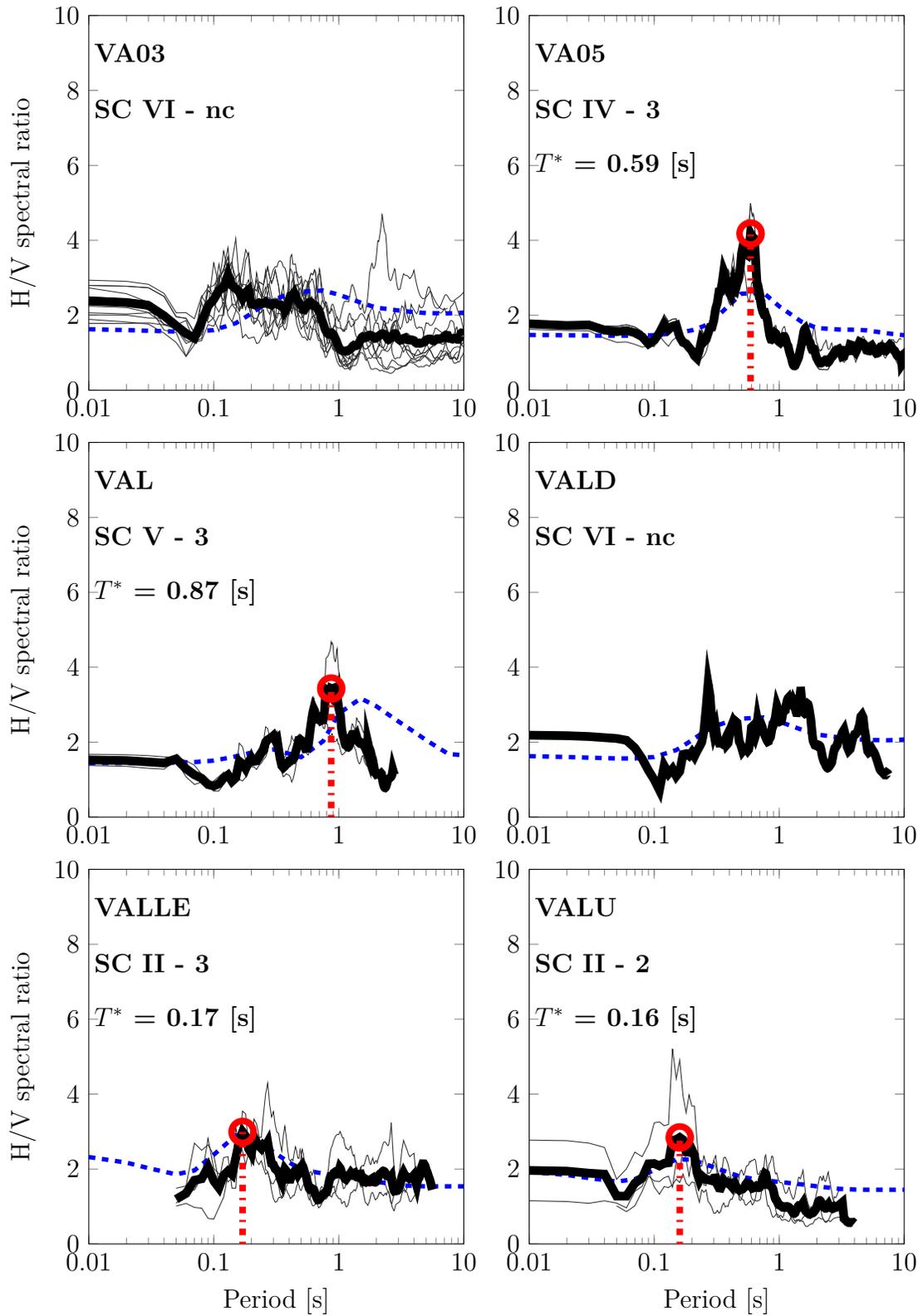


Figura B.25: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

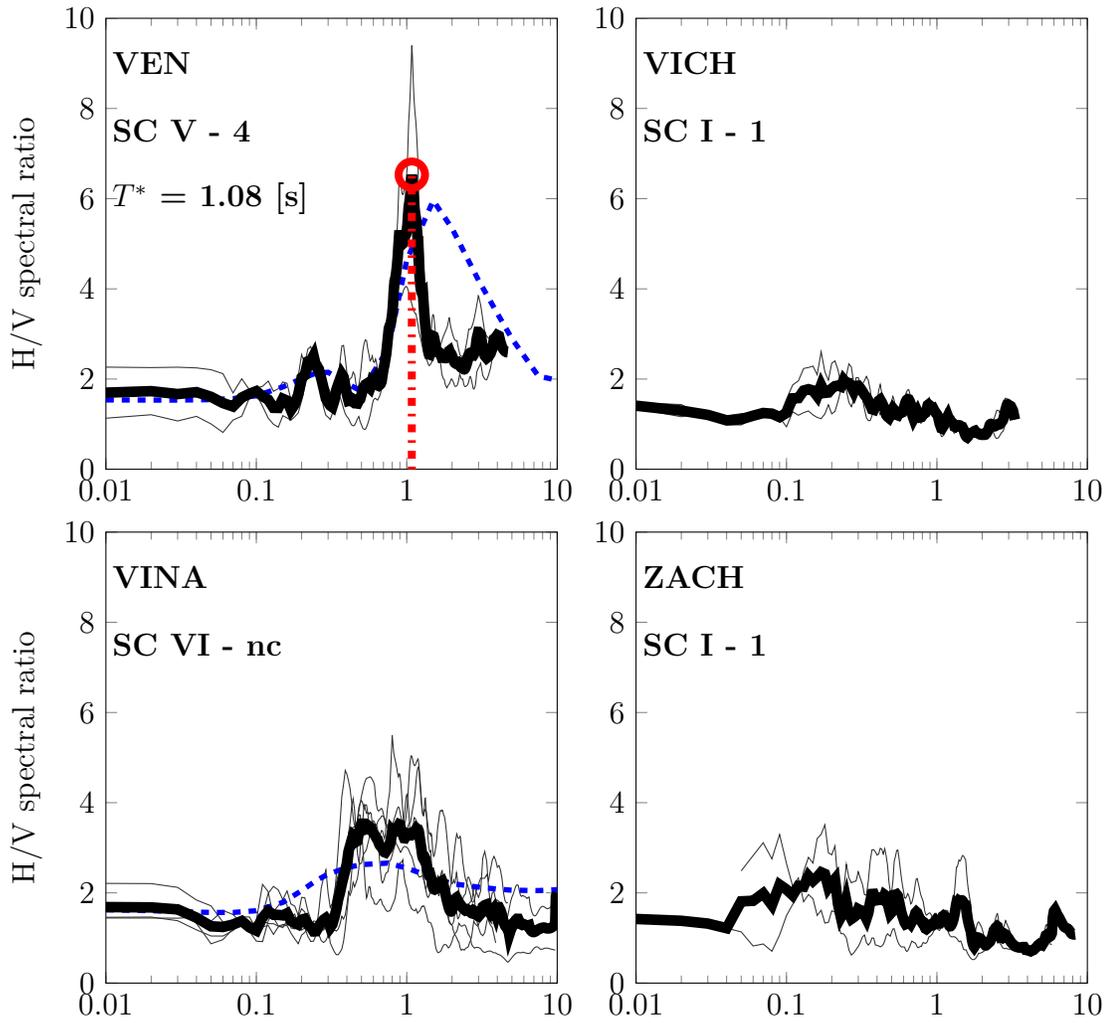


Figura B.26: Relaciones H/V de los espectros de respuesta de aceleración con 5% de amortiguamiento para diferentes estaciones. La línea más gruesa muestra el promedio en función del periodo, con el valor más alto marcado en un círculo.

Apéndice C

Operaciones básicas de la base de datos

En este material anexo se muestran ejemplos de diferentes operaciones básicas de la base de datos, con énfasis en su actualización. Todos los códigos presentados aquí se ejecutan dentro del entorno de MATLAB [Mat].

C.1. Agregar nuevos registros de aceleraciones

Tal como se menciona en el Capítulo 3, la información de la base de datos se almacena en un archivo de información de MATLAB llamado `Sismos.mat`. A través de `load('Sismos.mat')`, es posible cargar en *Workspace* la estructura `Registros` y los mapas `CatalogoEstaciones` y `CatalogoEventos`.

La estructura `Registros` contiene la información de los registros de aceleraciones. Para agregar un registro nuevo, se debe crear un nuevo elemento dentro de la estructura que contenga las series de tiempo de las tres componentes, el código de la estación y el código del evento. Idealmente se debe respetar que el canal 1 y canal 2 correspondan a las componentes horizontales, mientras que el canal 3 a la vertical. A continuación se muestra un ejemplo:

```
N = length(Registros);
Registros(N + 1).Canal1 = VectorAcc1;
Registros(N + 1).Canal2 = VectorAcc2;
Registros(N + 1).Canal3 = VectorAcc3;
Registros(N + 1).estacion = 'CodigoEstacion'
Registros(N + 1).evento = 'CodigoEvento'
```

Tanto `'CodigoEvento'` como `'CodigoEstacion'` deben corresponder de manera exacta a los códigos ya utilizados. En el caso de que el registro de aceleraciones involucre una nueva estación o un nuevo evento, se deberán agregar a los mapas respectivos. Como ejemplo de un hipotético evento ocurrido el 1 de enero de 2050 a las 00:01 horas, éste se agrega de la siguiente forma:

```
Evento.ID = '5001010001';  
Evento...  
  
CatalogoEventos('5001010001') = Evento;
```

De forma análoga se agregan estaciones nuevas no incluidas en el mapa de estaciones. Para finalizar la actualización, todos los cambios quedan guardados utilizando la siguiente línea:

```
save Sismos Registros CatalogoEstaciones CatalogoEventos
```

C.2. Procesar registros de aceleraciones

Para procesar la información almacenada en `Sismos.mat`, se utiliza el objeto `output`, que se inicia con

```
Datos = output
```

A partir de ahí es posible seleccionar parámetros para especificar las características de los registros de aceleraciones de interés. Por ejemplo, se puede filtrar registros con valores mínimos y máximos de PGA, magnitud de evento, distancia de la fuente sísmica a la estación, etc. (para más parámetros ver Tabla (3.5)). Finalmente, se pueden obtener archivos `.txt` con los registros de aceleraciones seleccionados dentro de una carpeta indicada a partir de

```
Datos.ExpRegistros('Carpeta');
```

Las opciones del procesamiento pueden ser modificadas en el objeto `Acce1.m`. Por defecto se utilizan las descritas en el Capítulo 3.