



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

**Evaluación de combinación de componentes horizontales de registros sísmicos
usando los métodos: GMax, GM, GMRotDpp, GMRotIpp y SRSS.**

AUTOR:

Suarez Saigua, Miguel Vicente

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de

INGENIERO CIVIL

TUTOR:

Hernández Barredo, Jaime Francisco

Guayaquil, Ecuador

26 de Febrero del 2020



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **Suarez Saigua, Miguel Vicente**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR (A)

f. _____

Hernández Barredo, Jaime Francisco

DIRECTOR DE LA CARRERA

f. _____

Alcívar Bastidas, Stefany Esther

Guayaquil, a los 26 del mes de Febrero del año 2020



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Suarez Saigua, Miguel Vicente**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **Evaluación de combinación de componentes horizontales de registros sísmicos usando los métodos: GMax, GM, GMRotDpp, GMRotIpp y SRSS** previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 26 del mes de Febrero del año 2020

EL AUTOR (A)

f. _____

Suarez Saigua, Miguel Vicente



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, **Suarez Saigua, Miguel Vicente**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Evaluación de combinación de componentes horizontales de registros sísmicos usando los métodos: GMax, GM, GMRotDpp, GMRotIpp y SRSS**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 26 del mes de Febrero del año 2020

EL AUTOR:

f. _____

Suarez Saigua, Miguel Vicente

REPORTE URKUND



Urkund Analysis Result

Analysed Document: SUAREZ_MIGUEL_FINAL.docx (D63861937)
Submitted: 2/13/2020 7:31:00 PM
Submitted By: claglas@hotmail.com
Significance: 3 %

Sources included in the report:

Tesis Kevin Anthony Ortiz Galindo.pdf (D55294693)
<https://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico/article/download/19/pdf/>
https://www.researchgate.net/publication/283290553_Evaluacion_de_medidas_de_intensidad_del_movimiento_del_suelo_independientes_de_la_orientacion_del_sensor_para_una_base_de_datos_con_acelerogramas_de_Costa_Rica_El_Salvador_y_Nicaragua

Instances where selected sources appear:

AGRADECIMIENTO

A mis padres, por apoyarme en esta etapa de mi vida, en la cual me genera una enorme satisfacción hacerlos sentir orgullosos de mis logros.

A mi hermana, que ha sido un gran pilar para mi formación como Ingeniero Civil, sin su ayuda para elaborar los informes en Ingles no hubiera llegada hasta este nivel. Tengo la firmeza que ella será una gran Ingeniera Civil en el futuro.

A los entrenadores Luis Quiñonez y Pedro García, encargados de la selección de Fútbol Sala de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil por ayudarme a formarme no solo como profesional sino también como jugador y persona. Gracias a sus consejos superé cada obstáculo que se me presentó a lo largo de mi carrera Universitaria.

A mis compañeros de la selección de Fútbol Sala de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil por enseñarme el valor del compañerismo y respeto. Fue un honor compartir vestuario con jugadores de gran nivel con una técnica exquisita que me sorprendió y fomentó en mí a entrenar horas extras para ser mejor jugador cada día. Me es grato recordar una frase que jamás olvidaré: “*Si no hay técnica, no hay táctica; si no hay táctica, no hay psicológico; si no hay psicológico, no hay nada*”.

A mis grandes amigos de la carrera, realmente conocerlos y compartir grandes momentos ha sido un enorme privilegio que me ha dado la vida, recuerdo con gran alegría aquella vez que salimos de la clase de Resistencia de materiales 1 y nadie había entendido nada; nos miramos y dijimos: tenemos que reunirnos para estudiar; aquel día fue el umbral de una gran aventura que pronto escribirá una página dorada de la historia de la facultad de ingeniería.

A mi tutor, el Ingeniero Jaime Hernández por la confianza que depósito en mí para desarrollar este trabajo de grado, me atrevo a confesar que es mi ejemplo a seguir como Ingeniero civil, su gran vocación para enseñar provocó en mí que me eduque más allá de lo que se enseña en clases; buscando siempre la excelencia.

A mi Mascota Kayser III, que me acompañó en aquellas noches que me desvelaba estudiando; su presencia y cariño hicieron que nunca desista por más grande que sea la dificultad.

DEDICATORIA

A Dios, por darme Salud y sabiduría para superar los obstáculos.

A mi madre, por ser la luz de aquel faro que ilumina mi camino con su resplandor y me guía por la senda de un futuro prometedor.

A mi padre, por apoyarme en el inicio de esta etapa Universitaria.

A mi hermana, por el inmenso cariño que me muestra a diario.

A mi gran amigo Carlos Gamarra, por la calidad de su amistad y por su generosidad.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA INGENIERÍA CIVIL**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

LILIA VALAREZO MORENO DE PAREJA

DECANO

f. _____

JOSÉ ANDRÉS BARROS CABEZAS

COORDINADOR DEL ÁREA

f. _____

GUILLERMO ALFONSO PONCE VÁSQUEZ

OPONENTE

ÍNDICE

Contents

INTRODUCCIÓN	2
CAPÍTULO 1	3
1.1. Antecedentes	3
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos Específico	4
1.3. Alcance	4
CAPÍTULO 2	5
2. Marco teórico	5
2.1. Introducción.....	5
2.2. Registros sísmicos	5
2.3. Cálculo de la respuesta dinámica de estructuras	7
2.3.1. Método de Newmark.....	8
2.3.2. Sistemas Lineales	8
2.4. Espectros de Respuesta Elástico.....	10
2.4.1. Espectro de respuesta de pseudo-aceleración	11
2.5. Métodos de combinación de componentes horizontales	12
2.5.1. Media Geométrica (Geometric Mean) “GM”	12
2.5.2. GMRotDpp.....	13
2.5.3. GMRotIpp	16
2.5.4. SRSS	19
2.5.5. GMax	21
CAPÍTULO 3	26
3. Metodología	26
3.1. Introducción.....	26

3.2.	Registros Sísmicos	26
3.3.	Espectro de respuesta de componentes horizontales originales	30
3.4.	Métodos de combinación de componentes horizontales	33
3.4.1.	Media Geométrica (Geometric Mean) “GM”	33
3.4.2.	Media Geométrica Rotacional “GM-ROT-D y GM-ROT-I”.....	34
3.4.3.	GMRotDpp.....	36
3.4.4.	GMRotIpp	37
3.4.5.	SRSS	39
3.4.6.	GMAX	40
	CAPÍTULO 4	42
4.	Resultados	42
4.1.	Evaluación entre GM, GMRotDpp y GMRotIpp	42
4.2.	Evaluación entre SRSS y GMAX.....	45
4.3.	Evaluación entre GM y GMAX.....	46
4.4.	Evaluación entre GM, SRSS y GMax	48
4.5.	Casos donde ocurren respuestas similares entre las componentes horizontales	50
4.6.	Casos donde ocurren las mayores diferencias entre las componentes horizontales	52
4.7.	GMax/GM vs T	54
4.8.	Ecuador-Pedernales 2016: GMax/GM vs T.....	56
4.9.	Chile-Maule 2010: GMax/GM vs T	58
4.10.	Global: GMax/GM vs T	60
	CAPÍTULO 5	61
5.	Conclusiones y recomendaciones	61
5.1.	Conclusiones.....	61
5.2.	Recomendaciones	61

6.	REFERENCIAS.....	63
7.	ANEXOS	65
7.1.	Ecuador-Pedernales 2016.....	66
7.1.1.	GM ($\theta i = 0^\circ$: $\Delta\theta = 1^\circ$: $\theta f = 90^\circ$).....	66
7.1.2.	GM, GMRotD50 y GMRotI50.....	72
7.1.3.	GM, SRSS, GMax, EO y NS	78
7.1.4.	GM vs GMax	84
7.1.5.	SRSS vs GMax.....	90
7.1.6.	Respuesta de Pseudo Aceleraciones para T=1seg (EO, NS, SRSS, GMax, GM y GMRotD50).....	96
7.1.7.	GMax/GM	105
7.1.8.	Espectro de frecuencias.....	111
7.2.	Chile-Maule 2010.....	122
7.2.1.	GM ($\theta i = 0^\circ$: $\Delta\theta = 1^\circ$: $\theta f = 90^\circ$).....	122
7.2.2.	GM, GMRotD50 y GMRotI50.....	127
7.2.3.	GM, SRSS, GMax, EO y NS	132
7.2.4.	GM vs GMax	137
7.2.5.	SRSS vs GMax.....	142
7.2.6.	Respuesta de Pseudo Aceleraciones para T=1seg (EO, NS, SRSS, GMax, GM y GMRotD50).....	147
7.2.7.	GMax/GM	154
7.2.8.	Espectro de frecuencias.....	159

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Dibujo esquemático de un instrumento para medir vibraciones y registrar el movimiento.	5
Figura 2, Distribución espacial de las estaciones de la Red Nacional de Acelerógrafos del Ecuador.....	6
Figura 3, Mapa de intensidades MSK-64 e isosistas del terremoto de Chile-Maule 2010.....	7
Figura 4. (a) Excitación dinámica del Suelo (b) Respuestas en el tiempo de deformaciones (c) Espectro de respuesta de desplazamiento.	10
Figura 5. Diagrama de cuerpo libre de la fuerza estática equivalente.	11
Figura 6.Espectros de respuesta que muestran ángulos de rotación independientes del período que minimizan y maximizan la media geométrica en el período 1 segundo, también se muestran espectros de respuesta para los cuales se usa un ángulo de rotación diferente para cada período para minimizar y maximizar la media geométrica.	13
Figura 7.Media geométrica de los movimientos registrados en la Presa Pacoima para el terremoto de San Fernando ocurrido en 1971, se calculó para 4 períodos como una función del ángulo rotacional.....	15
Figura 8.Ángulos de rotación correspondientes al máximo y mínimo valor de la media geométrica. (Se calculó estos valores incluyendo los ángulos redundantes, por tal razón la gráfica excede el rango de los 90°)	17
Figura 9.El gráfico superior muestra la relación de la media geométrica de un conjunto de períodos con respecto al GMRotDpp en función del ángulo de rotación. El gráfico inferior muestra la función de penalización construida en base al conjunto de medias geométricas normalizadas, el mínimo valor de la función representa el ángulo de rotación que presentó la menor dispersión entre la media geométrica y el GMRotDpp, de este ángulo resulta un espectro de respuesta el cual es llamado GMRotIpp.....	18
Figura 10. Fórmula de combinación de componentes horizontales de un Sismo.....	20
Figura 11.Comparación de los espectros de respuesta de las componentes EO y NS con el método de combinación espectral SRSS de la estación ALOR perteneciente al terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.	21
Figura 12. Respuesta sísmica Unidireccional y Bidireccional.....	22
Figura 13. Respuesta ortogonal en cada instante de tiempo (t).	22

Figura 14. Respuesta de aceleración combinada mediante SRSS en el T=1 segundo.	23
Figura 15. Respuesta de aceleración combinada mediante SRSS en el T=1.5 segundos.	23
Figura 16. Espectro de respuesta del método de combinación de componentes horizontales GMax.....	24
Figura 17. Órbita de aceleraciones para calcular la máxima y mínima demanda espectral.....	25
Figura 18. Registro de aceleraciones del suelo de la componente ESTE-OESTE de la estación ACHN.	30
Figura 19. Registro de aceleraciones del suelo de la componente NORTE-SUR de la estación ACHN.	30
Figura 20. Respuesta de Pseudo aceleraciones de la componente ESTE-OESTE para T=1 segundo.....	31
Figura 21. Respuesta de Pseudo aceleraciones de la componente NORTE-SUR para T=1 segundo.....	32
Figura 22. Espectro de respuesta de la componente original ESTE-OESTE.....	32
Figura 23. Espectro de respuesta de la componente original NORTE-SUR.....	33
Figura 24. Media Geométrica (Geometric Mean) “GM” de las componentes horizontales originales de la estación ACHN.	34
Figura 25. Espectros de respuesta de la componente ESTE-OESTE para un conjunto de ángulos.	35
Figura 26. Espectros de respuesta de la componente NORTE-SUR para un conjunto de ángulos.	35
Figura 27. Combinación de las respuestas espectrales de ambas componentes horizontales mediante el método de la media Geométrica (GM)	36
Figura 28. Combinación GM de las respuestas espectrales para los percentiles 0,50 y 100 de la estación ACHN.....	37
Figura 29. Cálculo de la normalización de GM/GMRotDpp para un percentil igual a 50 de la estación ACHN.....	38
Figura 30. Cálculo de la Función de Penalización para un percentil igual a 50 de la estación ACHN.	38

Figura 31. Combinación GM de las respuestas espectrales para un percentil igual a 50 de la estación ACHN.....	39
Figura 32. Combinación SRSS de las respuestas espectrales de la estación ACHN.	40
Figura 33. Combinación espectral GMax de la estación ACHN.....	41
Figura 34. Registros sísmicos más representativos del terremoto de Chile-Maule 2010.	43
Figura 35. Registros sísmicos más representativos del terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.	43
Figura 36. Resultados de los métodos GM, GMRotD50 y GMRotI50 de los registros sísmicos más representativos del terremoto de Chile-Maule 2010.....	44
Figura 37. Resultados de los métodos GM, GMRotD50 y GMRotI50 de los registros sísmicos más representativos del terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.	45
Figura 38. Resultados de los métodos SRSS y GMax de los registros sísmicos más representativos del terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.	46
Figura 39. Resultados de los métodos GM y GMax de los registros sísmicos más representativos del terremoto de Chile-Maule 2010.	47
Figura 40. Resultados de los métodos GM y GMax de los registros sísmicos más representativos del terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.	48
Figura 41. Resultados de los métodos GM, SRSS, GMax perteneciente a la estación ACH1 del terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.	49
Figura 42. Resultados de los métodos GM, SRSS, GMax perteneciente a la estación Valdivia del terremoto de Chile-Maule 2010.....	50
Figura 43. Combinaciones espectrales para T=2.68 seg de la estación ACH1 del terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.	51
Figura 44. Combinaciones espectrales para T=2.68 seg de la estación Valdivia del terremoto de Chile-Maule 2010.	52
Figura 45. Combinaciones espectrales para T=1,085 seg de la estación ACH1 del terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.	53
Figura 46. Combinaciones espectrales para T=1,18 seg de la estación Valdivia del terremoto de Chile-Maule 2010.	54
Figura 47.Relación GMax/GM vs T para todos los registros sísmicos del terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.....	55

Figura 48.Relación GMax/GM vs T para todos los registros sísmicos del terremoto de Chile-Maule 2010.....	55
Figura 49.Relación GMax/GM vs T para los registros sísmicos situados en la clasificación del Grupo 1 y pertenecientes al terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.	56
Figura 50. Relación GMax/GM vs T para los registros sísmicos situados en la clasificación del Grupo 2 y pertenecientes al terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.	57
Figura 51. Relación GMax/GM vs T para los registros sísmicos situados en la clasificación del Grupo 3 y pertenecientes al terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.	57
Figura 52. Relación GMax/GM vs T para los registros sísmicos situados en la clasificación del Grupo 1 y pertenecientes al terremoto de Chile-Maule 2010.	58
Figura 53. Relación GMax/GM vs T para los registros sísmicos situados en la clasificación del Grupo 2 y pertenecientes al terremoto de Chile-Maule 2010.	59
Figura 54. Relación GMax/GM vs T para los registros sísmicos situados en la clasificación del Grupo 3 y pertenecientes al terremoto de Chile-Maule 2010.	59
Figura 55. Relación GMax/GM vs T para todos los registros sísmicos analizados en este trabajo de grado (Ecuador-Pedernales 2016 y Chile Maule 2010).	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los registros sísmicos del terremoto de Pedernales del 16 de Abril del 2016.	27
Tabla 2. Clasificación de los registros sísmicos del terremoto de Chile del 27 de Febrero del 2010.	28

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se estudiará los espectros elásticos de la combinación de registros sísmicos usando los métodos: GMax, GM, GMRotDpp, GMRotIpp y SRSS.

Para el cálculo de las combinaciones espetrales de componentes horizontales ortogonales se desarrolló un código de programación el cual, mediante el método de Newmark (Chopra, 2014), calcula la respuesta dinámica de cada dirección para una estructura de 1 grado de libertad (aceleración, velocidad y desplazamiento) con un valor de amortiguamiento (ξ) constante de 5%. Además, se obtuvieron las pseudo-aceleraciones en base a la respuesta de desplazamientos.

Se procesaron 50 pares de acelerogramas (29 registros del sismo de Ecuador-Pedernales 2016 y 21 registros del Sismo de Chile-Maule 2010). Se compararon las diferencias que existe entre los métodos de combinación de las componentes horizontales. Primero el estudio se centra en la diferencia entre los espectros obtenidos en las combinaciones GM, GMRotD y GMRotI. Luego, se estudia la diferencia que existe entre las combinaciones SRSS y GMax de una manera más detallada a lo realizado por (Lascano, 2018). Finalmente se evaluaron las diferencias encontradas entre las combinaciones GMax y GM, se proponen ecuaciones de conversión de GM a GMax y se compararon estas con los factores de escala de GMax/GM propuestos en la (American Society of Civil Engineers, 2017, p.205).

Palabras Claves: Espectros de respuesta, pseudo-aceleraciones, acelerogramas, período, rotaciones, factores de escala, componente y combinación.

ABSTRACT

In this titration work, it will study the elastic spectra of the combination of seismic records using the methods: GMax, GM, GMRotDpp, GMRotIpp and SRSS.

To calculate the spectral combinations of orthogonal horizontal components, a programming code was developed which, using the Newmark method (Chopra, 2014), calculates the dynamic response of each direction for a structure of 1 degree of freedom (acceleration, speed and displacement) with a constant damping value (ξ) of 5%. In addition, pseudo-accelerations were obtained based on the displacement response.

50 pairs of acelerograms were processed (29 records of the Ecuador-Pedernales 2016 earthquake and 21 records of the Chile-Maule 2010 earthquake). The differences between the methods of combining the horizontal components were compared. First, the study focuses on the difference between the spectra obtained in the GM, GMRotD and GMRotI combinations. Then, the difference that exists between the SRSS and GMax combinations is studied in a more detailed way than what was done by (Lascano, 2018). Finally, the differences found between the GMax and GM combinations were evaluated, GM to GMax conversion equations are proposed and these were compared with the GMax / GM scale factors proposed in the (American Society of Civil Engineers, 2017, p.205).

Keywords: Spectrum of response, pseudo-accelerations, accelerograms, period, rotations, scale factors, component, and combination.

INTRODUCCIÓN

En la presente investigación se estudia los métodos de combinación de componentes horizontales: GMax, GM, GMRotDpp, GMRotIpp y SRSS; en la cual se analizará la importancia del tiempo en donde se producen las máximas respuestas de estructuras de 1 grado de libertad.

Las vibraciones del suelo durante un sismo se transmiten a través de las estructuras mediante aceleraciones, velocidades y desplazamientos, en la mayoría de los casos estas se amplifican produciendo fuerzas y desplazamientos que exceden la resistencia y rigidez de las estructuras. Los movimientos del suelo son medidos por instrumentos de movimiento, el cual registra la aceleración del suelo y los representa mediante acelerogramas, estos se corrigen por errores del instrumento y línea base. Las combinaciones de componentes horizontales se usan para generar los espectros de respuestas de varias estructuras de 1 grado de libertad, estos espectros se utilizan para obtener fuerzas y desplazamientos para una determinada frecuencia o período.

Este trabajo de grado tiene como objetivo calcular los espectros elásticos mediante la combinación de las componentes horizontales para posteriormente compararlos entre sí y determinar los pros y los contras de cada método. Los factores considerados para el efecto son: orientación del acelerógrafo, frecuencia de los registros, amortiguamiento considerado, etc.

CAPÍTULO 1

1.1. Antecedentes

Hoy en día, gracias a los avances tecnológicos es más fácil realizar los análisis históriatiempo de estructuras, este tipo de cálculo se lleva a cabo a través de programas computacionales que se encuentran disponibles en centros educativos con licencias académicas y en el internet con programas de libre acceso como Python.

El método GMax especificado en la norma ASCE7-10, calcula las respuestas en el tiempo de cada componente horizontal, luego las combina mediante la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS) para posteriormente obtener las máximas respuestas.

El método SRSS considera las máximas respuestas de cada componente horizontal en distintos tiempos en que estas ocurren, por ende, se considera que los resultados obtenidos son sobredimensionados con respecto a lo ocurrido en los movimientos sísmicos.

La orientación del acelerógrafo al captar los registros es un factor que genera incertidumbre en la ingeniería sísmica, es por ende que en este trabajo de titulación se desea estudiar y comparar, si girar las componentes en un intervalo de 0° a 90° para combinarlas por los métodos: GM, GMRotD y GMRotI; representaría una gran diferencia con los métodos GMax y SRSS.

Cabe resaltar que el objetivo de la media geométrica es encontrar un espectro de respuesta que considere las máximas respuestas de cada componente horizontal en función del ángulo rotacional y el período.

1.2.Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Estudiar los espectros elásticos de la combinación de componentes horizontales de registros sísmicos usando los métodos: “GMax, GM, GMRotDpp, GMRotIpp y SRSS”.

1.2.2. Objetivos Específico

- Comparar las diferencias que existe entre los métodos de combinación de las componentes horizontales para los registros sísmicos del sismo de Ecuador-Pedernales 2016 y del sismo de Chile-Maule 2010.
- Estudiar las diferencias obtenidas al calcular los espectros GM, GMRotD y GMRotI.
- Estudiar las diferencias obtenidas en el cálculo de los espectros GMax y SRSS.
- Estudiar las diferencias obtenidas en el cálculo de los espectros GM y GMax.
- Evaluar los factores de escala de GMax/GM publicado en la ASCE 7-16 (Sección 21.1) en función de los resultados obtenidos en este estudio.

1.3.Alcance

Se desarrollará un algoritmo para calcular la respuesta de una estructura de 1 grado de libertad con un valor de amortiguamiento (ξ) constante de 5%, sometido simultáneamente a las 2 componentes horizontales ortogonales de los registros en estudio.

Se estudiarán 29 registros obtenidos en el sismo en Ecuador-Pedernales (2016) y 21 registros del sismo en Chile-Maule (2010).

Las respuestas obtenidas para cada dirección, Norte-Sur y Este-Oeste, se combinarán mediante los métodos: “GMax, GM, GMRotDpp, GMRotIpp y SRSS”.

Se calcularán espectros de respuesta para cada combinación con el fin de estudiar sus diferencias en función del periodo natural de vibración de la estructura.

Se identificarán en qué situaciones ocurren las mayores y menores diferencias entre los distintos métodos de combinación, con los cuales se obtendrán conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO 2

2. Marco teórico

2.1. Introducción

En el presente capítulo se realiza una explicación de los aspectos más relevantes de las combinaciones espectrales en el estudio de la dinámica estructural.

Los sismos generalmente son una vibración aleatoria del suelo. De acuerdo con los estudios de los acelerogramas estos pueden ser vibratorios o impulsivos. Las ecuaciones para predecir estos movimientos usualmente se desarrollan para los espectros de respuesta correspondientes al movimiento horizontal. Los registros de aceleraciones del movimiento horizontal son obtenidos de componentes horizontales ortogonales, es decir existen 2 registros disponibles para cada estación sísmica; estos 2 registros se combinan en una sola medida de intensidad sísmica (GMax, SRSS, GM, GMRotD y GMRotI) que luego forma los espectros de respuesta.

2.2. Registros sísmicos

Los registros sísmicos o acelerogramas son una representación de las aceleraciones que se producen en el suelo en una determinada estación acelerográfica durante un evento sísmico. Cabe mencionar que la estación acelerográfica mide las tres componentes del movimiento (2 horizontales y 1 vertical).

Aunque los instrumentos de medición sean muy sofisticados y complejos, el elemento básico de estos instrumentos es en cierta forma un transductor. En su forma más simple, un transductor es un sistema de masa-resorte-amortiguador montado dentro de un marco rígido que está unido a la superficie de la cual se desea medir el movimiento (Chopra, 2014, p.95).

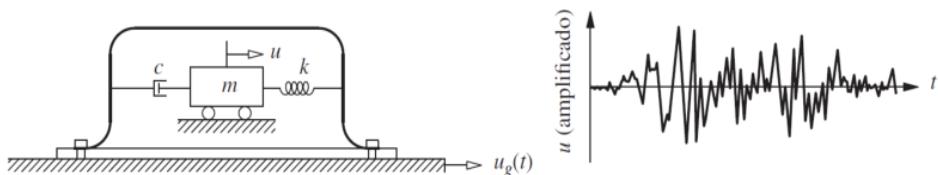


Figura 1. Dibujo esquemático de un instrumento para medir vibraciones y registrar el movimiento.

Fuente: (Chopra, 2014, p.96).

En la caracterización de los acelerogramas es importante conocer la propagación de la ruptura, velocidad de onda de corte, tipo de falla, tipo de suelo, la distancia de la falla, etc., es por lo que el estudio de los registros sísmicos es de vital importancia para la evaluación de las zonas sísmicas.

Los registros sísmicos analizados en este trabajo corresponden al terremoto de Ecuador-Pedernales del 16 de Abril del 2016 y al terremoto de Chile-Maule del 27 de Febrero del 2010 proporcionados respectivamente, por la “IG-EPN” (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica nacional) y la “fcfm” (Facultad de Ciencias físicas y matemáticas de la Universidad de Chile).

En la Figura 2, se muestra la distribución espacial de las estaciones acelerográficas que registraron los movimientos sísmicos ocurridos el 16 de Abril del 2016 en Ecuador.

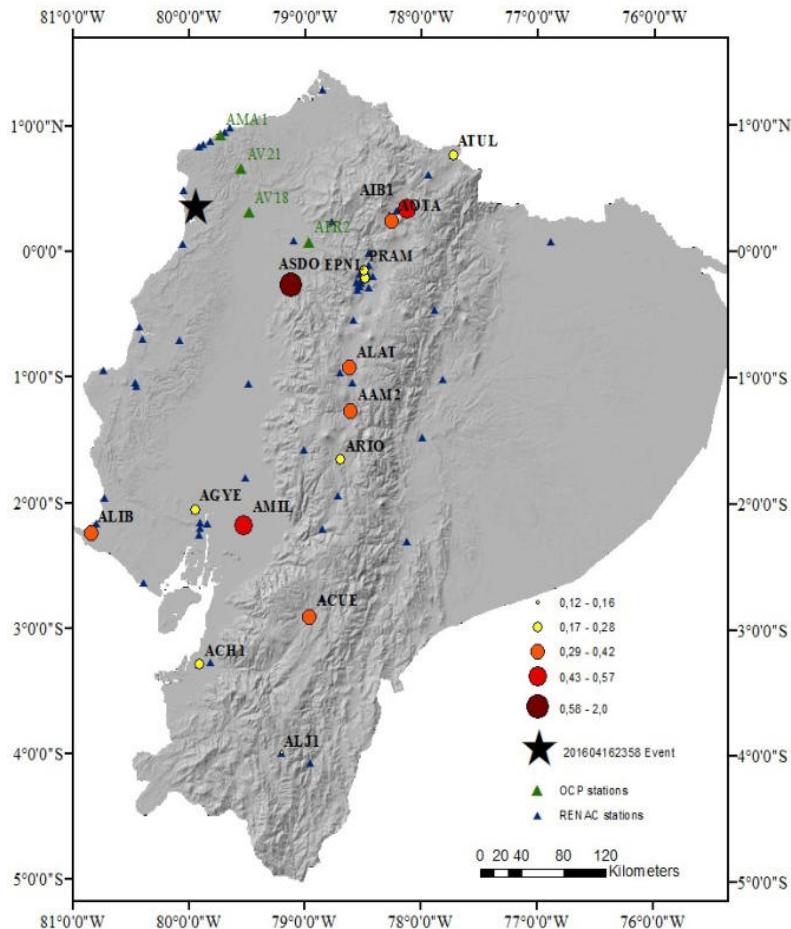


Figura 2, Distribución espacial de las estaciones de la Red Nacional de Acelerógrafos del Ecuador.

Fuente: INSTITUTO GEOFÍSICO ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

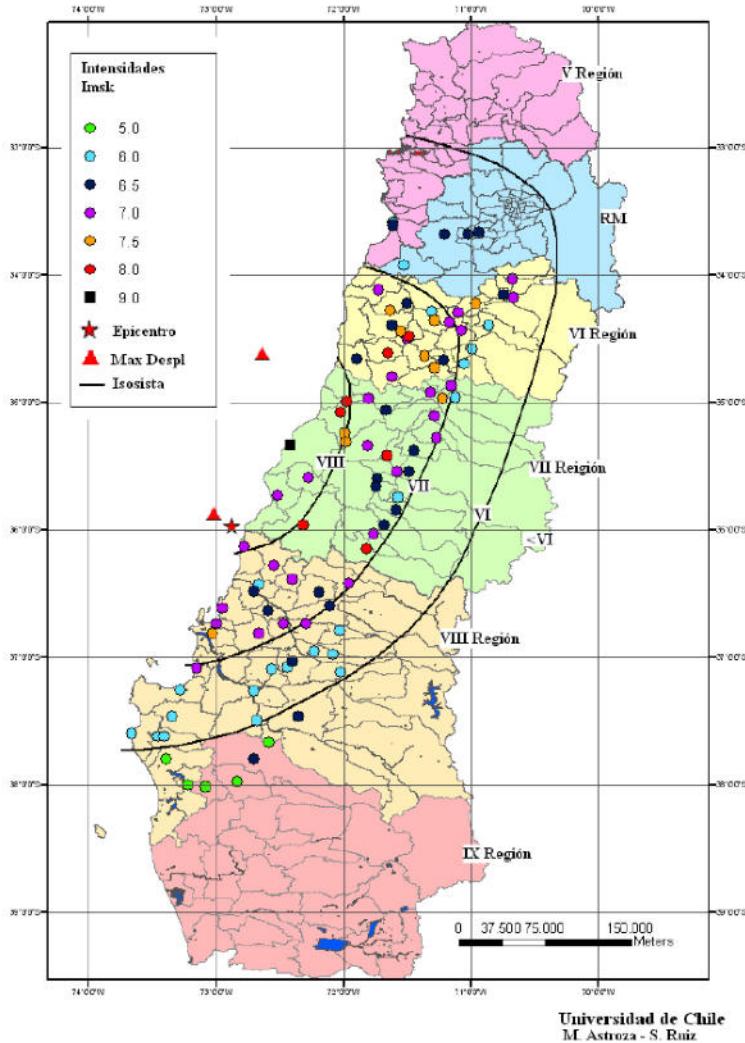


Figura 3, Mapa de intensidades MSK-64 e isosistas del terremoto de Chile-Maule 2010.

Fuente: (Aguiar Falconí, 2010, p.87)

En la Figura 3, se muestra un mapa de intensidades en la escala de intensidad macro sísmica MSK-64 que sirve para evaluar los efectos destructivos del movimiento telúrico con respecto a las construcciones y afectaciones a la población.

2.3.Cálculo de la respuesta dinámica de estructuras

La respuesta dinámica es el análisis mecánico que se realiza a las estructuras para determinar los efectos ante las acciones externas que producen las vibraciones.

En los trabajos de (Ávila, 2018; Chérrez, 2019; Lascano, 2018; Villao, 2018), el cálculo de las respuestas en el tiempo para los diferentes períodos de vibración de las

estructuras, se lo realizó mediante el método de sistemas lineales de “Newmark”, en el cual se considera una aceleración promedio constante.

2.3.1. Método de Newmark

En 1959, N. M. Newmark desarrolló una familia de métodos paso a paso en el tiempo basándose en las siguientes ecuaciones(Chopra, 2014, p.174):

$$m\ddot{u}_{i+1} + c\dot{u}_{i+1} + (fs)_{i+1} = p_i \quad (1)$$

donde $(fs)_i$ es la fuerza restauradora en el momento i ; $(fs)_i = ku_i$ para un sistema elástico lineal, pero si el sistema fuera no lineal, dependería de la historia previa del desplazamiento y de la velocidad en el instante i .

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + [(1 - \gamma)\Delta t]\ddot{u}_i + (\gamma\Delta t)\ddot{u}_{i+1} \quad (2)$$

$$u_{i+1} = u_i + (\Delta t)\dot{u}_i + [(0.5 - \beta)(\Delta t)^2]\ddot{u}_i + [\beta(\Delta t)^2]\ddot{u}_{i+1} \quad (3)$$

“Los parámetros β y γ definen la variación de la aceleración durante un paso de tiempo y determinan las características de estabilidad y precisión del método. La selección típica de γ es de $1/2$, y $1/6 \leq \beta \leq 1/4$ es satisfactoria desde todos los puntos de vista, incluido el de la precisión”(Chopra, 2014, p.174).

2.3.2. Sistemas Lineales

“Para los sistemas lineales es posible modificar la formulación original de Newmark a fin de permitir la resolución de las ecuaciones (1), (2) y (3) sin iteración. La ecuación (1) especificada para los sistemas lineales se convierte en:”(Chopra, 2014, p.175)

$$m\ddot{u}_{i+1} + c\dot{u}_{i+1} + ku_{i+1} = p_{i+1} \quad (4)$$

De la ecuación (3) \ddot{u}_{i+1} puede expresarse en términos de u_{i+1} :

$$\ddot{u}_{i+1} = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}(u_{i+1} - u_i) - \frac{1}{\beta\Delta t}\dot{u}_i - \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)\ddot{u}_i \quad (5)$$

Si se sustituye la ecuación (5) en la ecuación (2), resulta

$$\ddot{u}_{i+1} = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} (u_{i+1} - u_i) + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta}\right) \dot{u}_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \ddot{u}_i \quad (6)$$

Las ecuaciones (5) y (6) se sustituyen en la ecuación que controla el movimiento (4) en el instante $i+1$. Esta sustitución da:

$$\hat{k}u_{i+1} = \hat{p}_{i+1} \quad (7)$$

donde

$$\hat{k} = k + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} c + \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} m \quad (8)$$

y

$$\begin{aligned} \hat{p}_{i+1} = p_{i+1} &+ \left[\frac{1}{\beta (\Delta t)^2} m + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} c \right] u_i + \left[\frac{1}{\beta \Delta t} m + \left(\frac{\gamma}{\beta} - 1 \right) c \right] \dot{u}_i \\ &+ \left[\left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) m + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) c \right] \ddot{u}_i \end{aligned} \quad (9)$$

“Con \hat{k} y \hat{p}_{i+1} conocidas a partir de las propiedades del sistema m , k y c , los parámetros del algoritmo γ y β , y el estado del sistema en el tiempo i definido por u_i , \dot{u}_i y \ddot{u}_i , el desplazamiento en el tiempo $i + 1$ se calcula como:”(Chopra, 2014, p.176)

$$u_{i+1} = \frac{\hat{p}_{i+1}}{\hat{k}} \quad (10)$$

“Una vez que se conoce u_{i+1} , la velocidad \dot{u}_{i+1} y la aceleración \ddot{u}_{i+1} pueden calcularse a partir de las ecuaciones (6) y (5), respectivamente. La aceleración también puede obtenerse con base en la ecuación de movimiento en el tiempo $i + 1$:”(Chopra, 2014, p.176)

$$\ddot{u}_{i+1} = \frac{p_{i+1} - c\dot{u}_{i+1} - ku_{i+1}}{m} \quad (11)$$

2.4.Espectros de Respuesta Elástico

“Los registros sísmicos son empleados para el cálculo de espectros de respuesta los cuales permiten conocer las respuestas máximas (desplazamientos, velocidades y aceleraciones) para varias estructuras de 1 grado de libertad con diferentes períodos de vibración” (Lascano, 2018, p.8)

Los espectros de respuesta elástico tienen un enfoque central dentro de la ingeniería sísmica dado que permite caracterizar las excitaciones dinámicas del terreno y sus efectos sobre las estructuras; además proporciona la respuesta máxima (desplazamiento, velocidades y aceleraciones) de estructuras de 1GDL para una fracción de amortiguamiento ζ fijo y para diferentes períodos de vibración natural T_n .

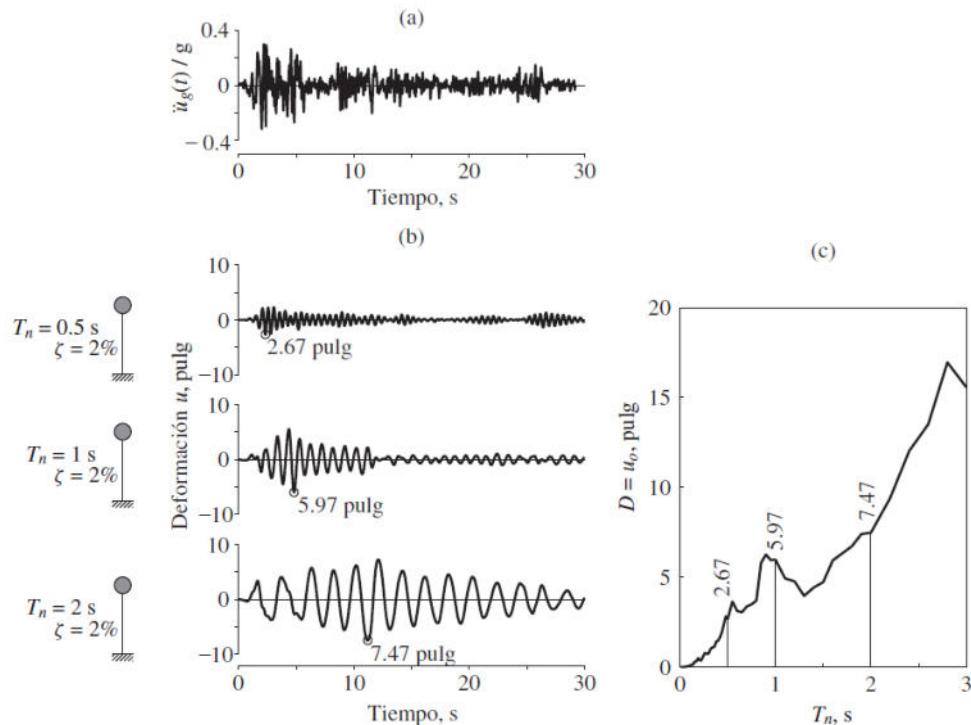


Figura 4. (a) Excitación dinámica del Suelo (b) Respuestas en el tiempo de deformaciones (c) Espectro de respuesta de desplazamiento.

Fuente:(Chopra, 2014, p.209).

En base al Método de Newmark descrito anteriormente se realiza el procesamiento de los acelerogramas de cada dirección horizontal de un evento sísmico, luego se obtiene el máximo absoluto de una estructura de 1GDL con una fracción de amortiguamiento ζ y período natural T_n específico; posteriormente se mantiene constante la fracción de

amortiguamiento ζ y se varía el período natural T_n ; este proceso se lo realiza cíclicamente para un conjunto de períodos. Finalmente se presenta en una gráfica en la cual se encuentran condesadas las respuestas máximas versus los períodos en análisis.

2.4.1. Espectro de respuesta de pseudo-aceleración

$$f_s(t) = k u(t)$$

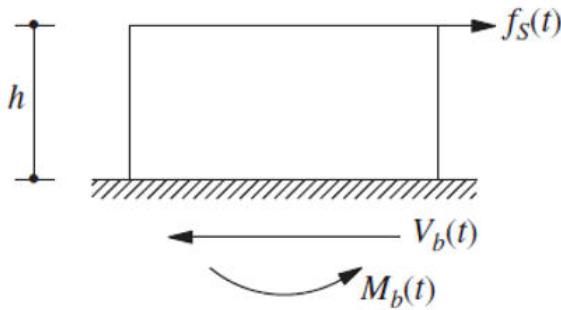


Figura 5. Diagrama de cuerpo libre de la fuerza estática equivalente.

Fuente: (Chopra, 2014, p.206).

Se considera k como la rigidez lateral del pórtico. Si se expresa k en términos de la masa m se obtiene la ecuación (12) y (13):

$$f_s(t) = m \omega_n^2 u(t) = m A(t) \quad (12)$$

Donde

$$A(t) = \omega_n^2 u(t) \quad (13)$$

La respuesta de pseudo-aceleración $A(t)$ de un sistema de 1GDL se calcula en función de la respuesta de deformación $u(t)$ y la frecuencia natural ω_n . Considerando una cantidad de A y $u=D$ para un movimiento sísmico, se obtiene la ecuación (14):

$$A = \omega_n^2 D = \left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2 D \quad (14)$$

2.5. Métodos de combinación de componentes horizontales

2.5.1. Media Geométrica (Geometric Mean) “GM”

Considerando un caso extremo, en el que, si uno de los sensores resulta estar alineado con la dirección de polarización, el espectro de respuesta del movimiento registrado en el sensor ortogonal sería cero y la media geométrica también, independientemente de la amplitud de la polarización del movimiento del suelo. “Esto podría ser una importante consideración cerca de fallas, donde la directividad de ruptura y el patrón de radiación puede producir movimientos fuertemente correlacionados en particularmente en períodos de 1 segundo o más”(Spudich, Chiou, Graves, Collins, & Somerville, 2004, p.11).

Para comprender el efecto de directividad (Near-Fault), se explica que la propagación de la ruptura hacia un sitio a una velocidad que es casi tan grande como la velocidad de onda de corte hace que la mayor parte de la energía sísmica de la ruptura llegue en un solo pulso de movimiento, esto ocurre al inicio del registro que lo captura. Este pulso de movimiento representa el efecto acumulativo de casi toda la radiación sísmica de la falla (Somerville, Smith, Graves, & Abrahamson, 1997, p.199).

La Media Geométrica “GM” es un método que considera las máximas respuestas de cada componente horizontal ocurridos en distintos tiempos y luego las combina mediante la raíz cuadrada del producto de las dos demandas espectrales ortogonales, esto sucede en función de un período T_i y un valor constante de amortiguamiento.

A continuación, se presenta la fórmula de la Media Geométrica (GM):

$$GM = \sqrt{RS(H_1) * RS(H_2)} \quad (15)$$

Donde:

$RS(H_1)$ =Respuesta espectral calculada para una componente horizontal

$RS(H_2)$ = Respuesta espectral calculada para la componente horizontal ortogonal a H_1 .

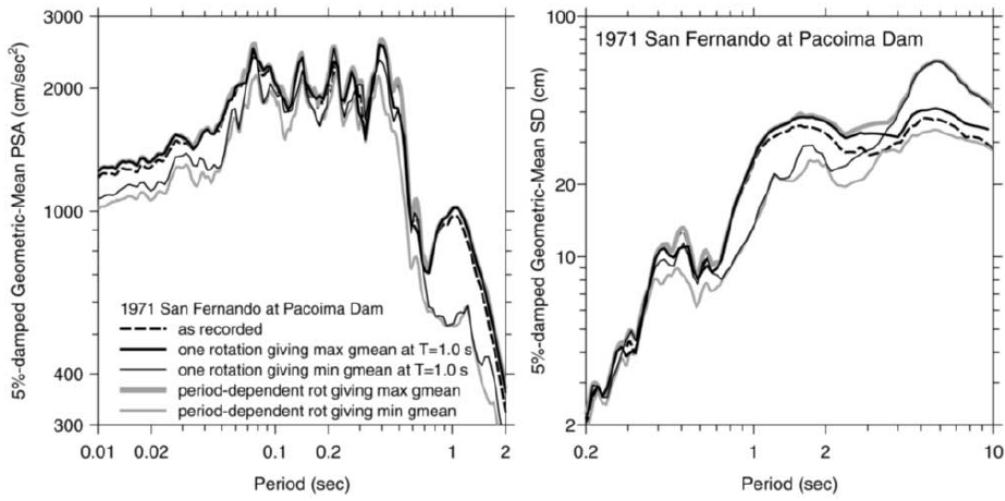


Figura 6. Espectros de respuesta que muestran ángulos de rotación independientes del período que minimizan y maximizan la media geométrica en el período 1 segundo, también se muestran espectros de respuesta para los cuales se usa un ángulo de rotación diferente para cada período para minimizar y maximizar la media geométrica.

Fuente:(Boore et al., 2006, p.1505).

En la Figura 6 se usaron los registros sísmicos de la presa Pacoima suscitados en el terremoto de San Fernando de 1971. La línea negra discontinua representa el espectro de respuesta de la media geométrica del registro como fue captado originalmente, es decir cuando $\theta=0^\circ$. La línea negra continua de mayor grosor y la de menor grosor revelan la existencia de un ángulo de rotación que maximiza y minimiza respectivamente la media geométrica en el período 1 segundo. La línea gris continua de mayor grosor y la de menor grosor simboliza la respuesta espectral que usa un distinto ángulo de rotación para cada período, de esta manera maximiza y minimiza la media geométrica. Cabe mencionar que en la gráfica se muestran los espectros de respuesta de pseudo-aceleraciones y de desplazamientos, teniendo en cuenta un 5% de amortiguamiento crítico.

2.5.2. GMRotDpp

Para el cálculo del GMRotDpp se utiliza todas las rotaciones no redundantes entre 0° y 90° , cabe destacar que si excede este rango las componentes horizontales toman valores simétricos; el término “GM” significa media geométrica, “Rot” indica que se usan rotaciones sobre los ángulos no redundantes, “D” indica que se usan rotaciones dependientes del período y “pp” indica el valor del percentil utilizado para la medida (0, 50 y 100 que corresponden al mínimo, mediano y máximo valor

respectivamente; el valor mediano probablemente será la medida comúnmente utilizada , en cuyo caso la nueva medida es llamada GMRotD₅₀)(Boore, Watson-Lamprey, & Abrahamson, 2006, p.1505).

Según la Real Academia Española, el percentil es el “valor que divide un conjunto ordenado de datos estadísticos de forma que un porcentaje de tales datos sea inferior a dicho valor”. El resultado del percentil se establece en un valor del 0% al 100%, Ejemplo: Si una persona presenta un percentil 70 en altura, esto significa que aproximadamente el 30% del resto de personas cuenta con una altura mayor, mientras que el 69% tiene una altura menor.

A continuación, se presenta los pasos para calcular el GMRotDpp:

1. A cada una de las componentes horizontales de aceleraciones se las nombra $Osc_1(t, \eta, 0)$ y $Osc_2(t, \eta, 0)$, donde “t” es el tiempo de registro, “η” es el porcentaje de amortiguamiento crítico de estudio y “0” indica el ángulo de rotación original del registro.
2. Establecer el ángulo de rotación θ de partida.
3. Definir los acelerogramas de las componentes horizontales con sus aceleraciones y el tiempo en que estas ocurren, luego utilizar las combinaciones lineales para girar estos registros sísmicos en función de un ángulo de rotación θ .

Las ecuaciones que precisan estas combinaciones lineales son:

$$Osc_1(t, \theta) = Osc_1(t, 0) * \cos(\theta) + Osc_2(t, 0) * \sin(\theta) \quad (16)$$

$$Osc_2(t, \theta) = -Osc_1(t, 0) * \sin(\theta) + Osc_2(t, 0) * \cos(\theta) \quad (17)$$

Donde por simplicidad de notación se elimina “η”, puesto que en todos los casos se emplea el mismo valor de fracción de amortiguamiento ζ .

4. Calcular las respuestas espectrales de cada componente horizontal para un conjunto de períodos y para un ángulo de rotación en específico

5. Calcular la media geométrica como se muestra en la ecuación (22), luego almacenar estos valores en una matriz que estará en función del ángulo rotacional y del período para un valor constante de amortiguamiento($GM(\theta, T_i)$).

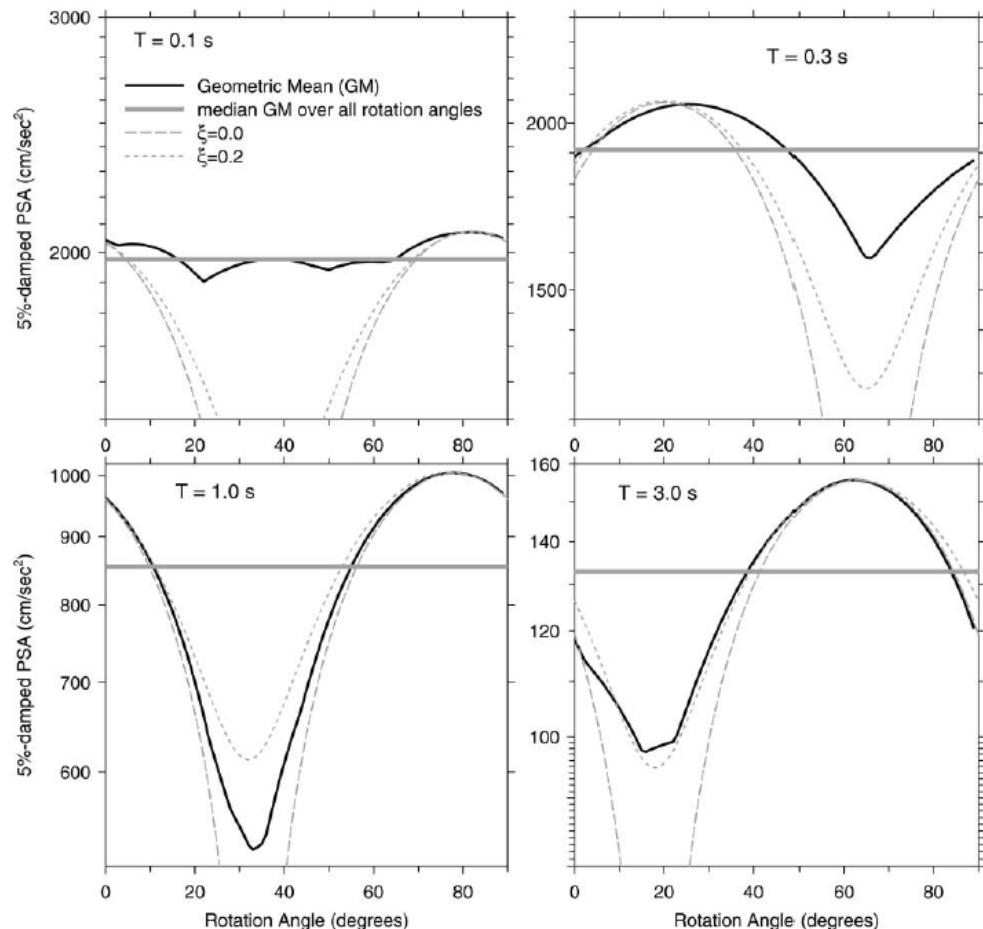


Figura 7. Media geométrica de los movimientos registrados en la Presa Pacoima para el terremoto de San Fernando ocurrido en 1971, se calculó para 4 períodos como una función del ángulo rotacional.

Fuente:(Boore et al., 2006, p.1506).

En la Figura 7 se puede observar la media geométrica para los períodos 0.1, 0.3, 1 y 3 segundos calculados a partir de un 5% de amortiguamiento crítico y pseudo aceleraciones. La línea continua negra representa la media geométrica sobre todos los ángulos de rotación no redundantes, la línea continua gris representa el valor de la media geométrica utilizando el percentil 50, el cual es llamado GM_{RotD50} y las líneas discontinuas grises “representan las predicciones basadas entre la relación de la media geométrica y la amplitud de la respuesta espectral en la dirección de la componente que haya registrado la mayor amplitud de respuesta”(Boore et al., 2006, p.1503).

6. Incrementar el ángulo de rotación θ en $\Delta\theta$ (Se recomienda que $\Delta\theta=1^\circ$ es suficiente para la precisión del método).
7. Repetir los pasos del 3 al 5 hasta que el ángulo de rotación sea igual a 90° .
8. “Clasificar el conjunto correspondiente de $GM(\theta, T_i)$ para todos los valores de θ y un valor fijo de T_i , de menor a mayor valor”(Boore et al., 2006, p.1506).
9. Establecer GMRotDpp en el valor de GM correspondiente al valor del percentil deseado para cada período T_i . El percentil más utilizado es el 50 (para un conjunto de rotaciones de 0 a 90° con un $\Delta\theta=1^\circ$, el valor del percentil 50 se calcula como el promedio de los valores entre los ángulos 45 y 46). Debido a la periodicidad del ángulo de 90° , GMRotDpp será independiente de la orientación original del acelerógrafo(Boore et al., 2006, p.1506).

2.5.3. GMRotIpp

El análisis dinámico requiere un espectro de respuesta que represente las respuestas máximas de estructuras de 1GDL, por lo tanto, la definición de GMRotDpp satisface el requerimiento que es independiente de la orientación del acelerógrafo, pero los valores de la media geométrica por período corresponden a diferentes ángulos de rotación, es por tal motivo que el objetivo del GMRotIpp es encontrar un espectro de respuesta correspondiente a un solo ángulo de rotación.

A continuación, se presenta los pasos para calcular el GMRotIpp:

1. Calcular el GMRotDpp para un rango de períodos.
2. “Para cada período, se normaliza el conjunto de medias geométricas para todos los ángulos de rotación con respecto a GMRotDpp”(Boore et al., 2006, p.1507).

$$\frac{GM(\theta, T_i)}{GMRotDpp(T_i)} \quad (18)$$

3. Calcular la función penalty (función de penalización o de error), definida por la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

$$penalty(\theta) = \frac{1}{N_{per}} \sum_{i=1}^h \left[\frac{GM(\theta, T_i)}{GMRotDpp(T_i)} - 1 \right]^2 \quad (19)$$

Donde el rango de períodos se extiende de T_1 a T_h , $GM(\theta, T_i)$ es la media geométrica del espectro de respuesta para el período T_i calculado para el ángulo de rotación θ y $GM_{RotDpp}(T_i)$ es el valor del percentil de $GM(\theta, T_i)$ sobre todos los ángulos no redundantes, como se definió previamente(Boore et al., 2006, p.1507).

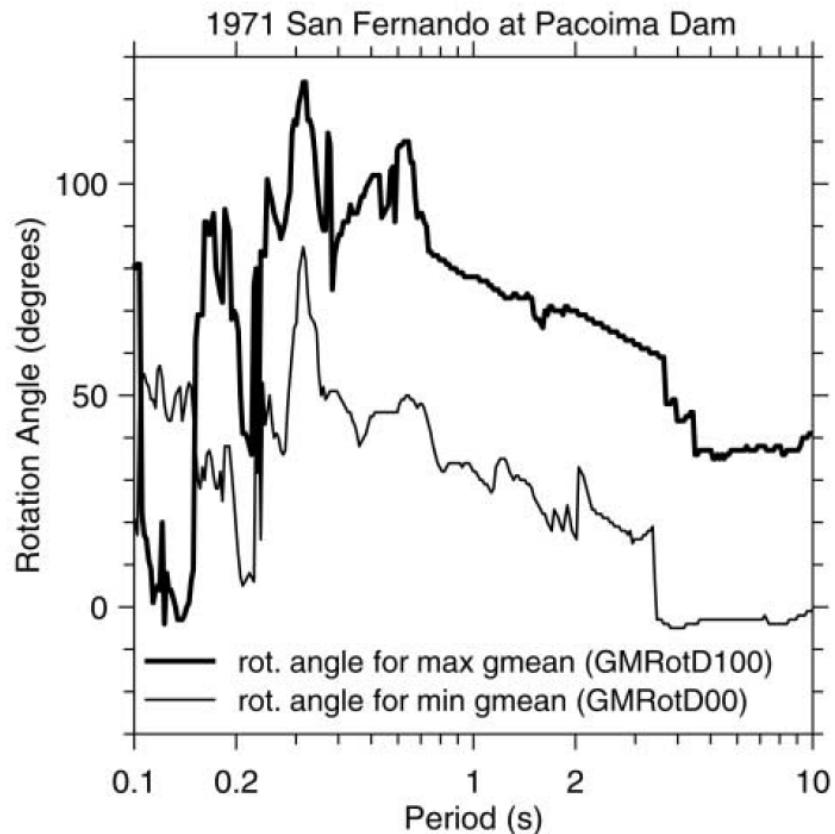


Figura 8.Ángulos de rotación correspondientes al máximo y mínimo valor de la media geométrica. (Se calculó estos valores incluyendo los ángulos redundantes, por tal razón la gráfica excede el rango de los 90°)

Fuente:(Boore et al., 2006, p.1507).

En la Figura 8 se puede apreciar que la línea negra continua representa la máxima media geométrica ($GM_{RotD100}$) y la línea gris continua representa la mínima media geométrica (GM_{RotD00}), evidentemente el mediano valor de la media geométrica (GM_{RotD50}) estaría posicionado en la mitad de las líneas descritas anteriormente. Cabe resaltar que la gráfica se calculó en base a los datos de los movimientos registrados en la Presa Pacoima para el terremoto de San Fernando ocurrido en 1971

4. Se encuentra el ángulo de rotación correspondiente al mínimo valor de la función penalty θ_{min} .
5. Finalmente, como en el cálculo de GMRotDpp ya se obtuvieron los espectros de respuesta para el rango de rotaciones en estudio, se selecciona el espectro de respuesta correspondiente al ángulo mínimo de la función penalty (θ_{min}). Este espectro de respuesta se le denomina GMRotIpp, donde la “I” significa que el ángulo de rotación es independiente del período.

$$GMRotIpp(T_i) = GM(\theta_{min}, T_i) \quad (20)$$

“La selección de θ_{min} busca evitar extremas variaciones lejos del valor del percentil deseado en todos los períodos”(Boore et al., 2006, p.1507).

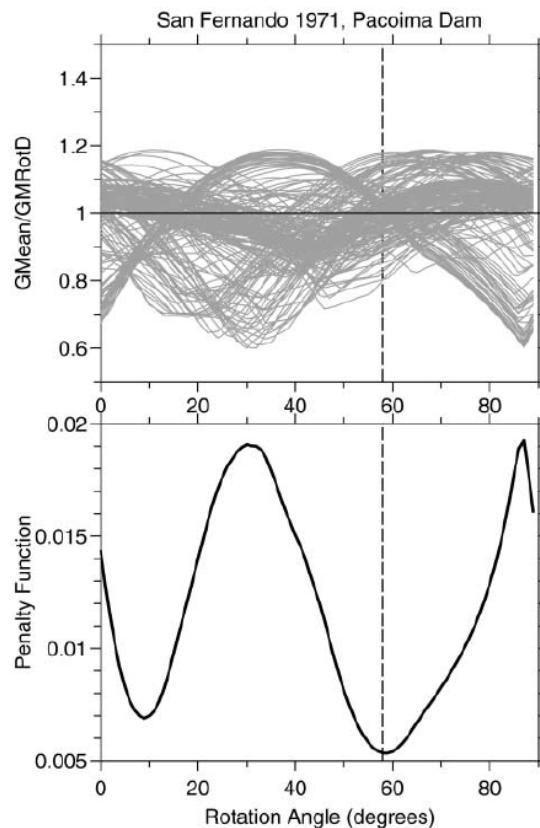


Figura 9. El gráfico superior muestra la relación de la media geométrica de un conjunto de períodos con respecto al GMRotDpp en función del ángulo de rotación. El gráfico inferior muestra la función de penalización construida en base al conjunto de medias geométricas normalizadas, el mínimo valor de la función representa el ángulo de rotación que presentó la menor dispersión entre la media geométrica y el GMRotDpp, de este ángulo resulta un espectro de respuesta el cual es llamado GMRotIpp.

Fuente:(Boore et al., 2006, p.1508).

La Figura 9 muestra específicamente en el gráfico superior una relación de las medias geométricas con el GMRotD50 para 200 períodos individuales; consecuentemente el gráfico inferior muestra la función de penalización construida con las 200 medias geométricas normalizadas, el valor mínimo de la función muestra un ángulo de rotación aproximadamente igual a 58°, este ángulo otorga un espectro de respuesta de la media geométrica denominado GMRotI50. Los resultados fueron calculados en base a los datos obtenidos del movimiento registrado en la Presa Pacoima para el terremoto de San Fernando de 1971.

2.5.4. SRSS

Las estructuras bajo la acción del movimiento del suelo se ven sometidas a fuerzas horizontales bidireccionales. La norma ASCE7 (American Society of Civil Engineers, 2016) provee dos métodos para aproximar simultáneamente las fuerzas ortogonales:

1. Procedimiento de la combinación ortogonal

“Combina los efectos del 100% de la carga sísmica aplicada en una dirección con el 30% de la carga sísmica aplicada en la dirección perpendicular”(Rosenblueth & Contreras, 1977).

2. Aplicación Simultánea del movimiento ortogonal del suelo

La estructura debe ser examinada usando el análisis de historia de la respuesta lineal (Linear Response History Analysis) dado que los efectos del movimiento sísmico se consideran por medio de acelerogramas. Cabe destacar que cada estación acelerográfica almacena 3 acelerogramas (2 horizontales y 1 vertical), siendo los registros de las componentes horizontales los más representativos para el estudio de la ingeniería sísmica. Estas componentes se combinan para formar un único espectro de respuesta.

“Se realiza la combinación espectral mediante la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS) de los espectros elásticos de cada una de las componentes horizontales”(Lascano, 2018, p.11).

“La mayoría de los códigos recomiendan analizar la estructura de forma independiente en dos direcciones ortogonales para obtener y combinar las máximas respuestas unidireccionales que interesen ($R_{x \ max}$ y $R_{y \ max}$), de esta manera estimar la máxima

respuesta bidireccional ($R_{xy\ max}$ en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**)”(Valdés González & Ordaz Schroeder, 2008, p.92).

$$SRSS = \sqrt{R_x^2 \max + R_y^2 \max} \quad (21)$$

En la Figura 10, la norma (NEC-SE-DS, 2015, p.38) calcula los efectos ortogonales con la siguiente ecuación:

$$E_h = \mp \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$$

Dónde:

E Efectos del sismo

E_h Componente horizontal de la fuerza sísmica

E_x Componente horizontal de la fuerza sísmica según el axis x

E_y Componente horizontal de la fuerza sísmica de dirección perpendicular a E_x

Figura 10. Fórmula de combinación de componentes horizontales de un Sismo.

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015, p.38).

La Figura 11 muestra los espectros de respuesta de la componente EO , NS y de la combinación espectral de la norma (ASCE, 2010). Estos espectros fueron generados a partir de la aceleración absoluta de los registros sísmicos en unidades de porcentaje de gravedad de la estación ALOR correspondiente al terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.

ESPECTRO DE ACELERACIÓN ABSOLUTA (ALOR)

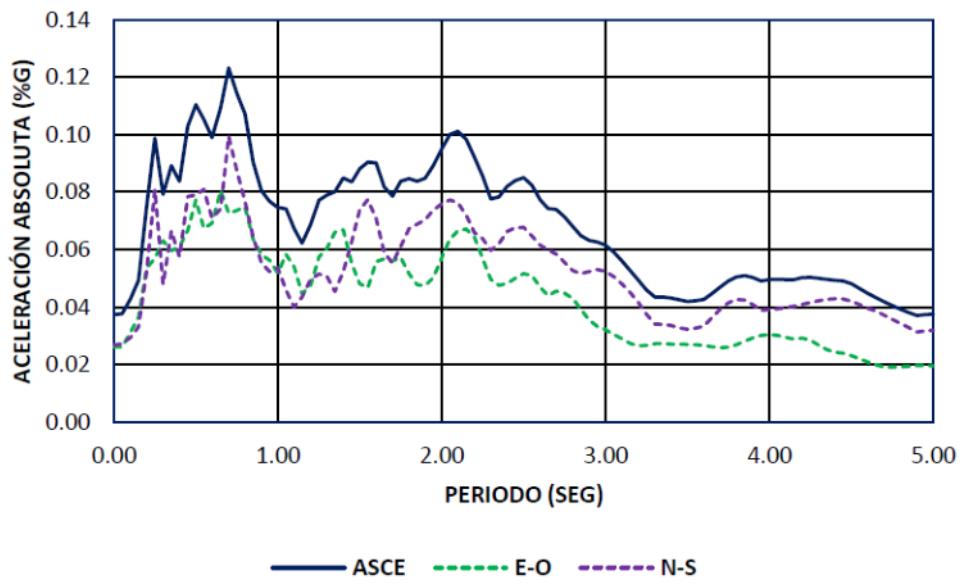


Figura 11. Comparación de los espectros de respuesta de las componentes EO y NS con el método de combinación espectral SRSS de la estación ALOR perteneciente al terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.

Fuente:(Lascano, 2018, p.10).

2.5.5. GMax

En los trabajos de grado de (Ávila, 2018; Lascano, 2018; Villao, 2018) se utilizó el método de respuestas máximas en el tiempo (RMT) como una metodología más apropiada para la combinación de componentes horizontales. En la norma (American Society of Civil Engineers, 2017) al método RMT se lo denomina como la respuesta máxima en el plano horizontal (GMax).

La Figura 12 , literal b) y c) presenta las respuestas unidireccionales en el tiempo para un período específico, luego el literal a) combina las respuestas en cada instante de tiempo mediante el método SRSS y finalmente se busca la respuesta bidireccional máxima que será considerada como la respuesta espectral para un “x” período.

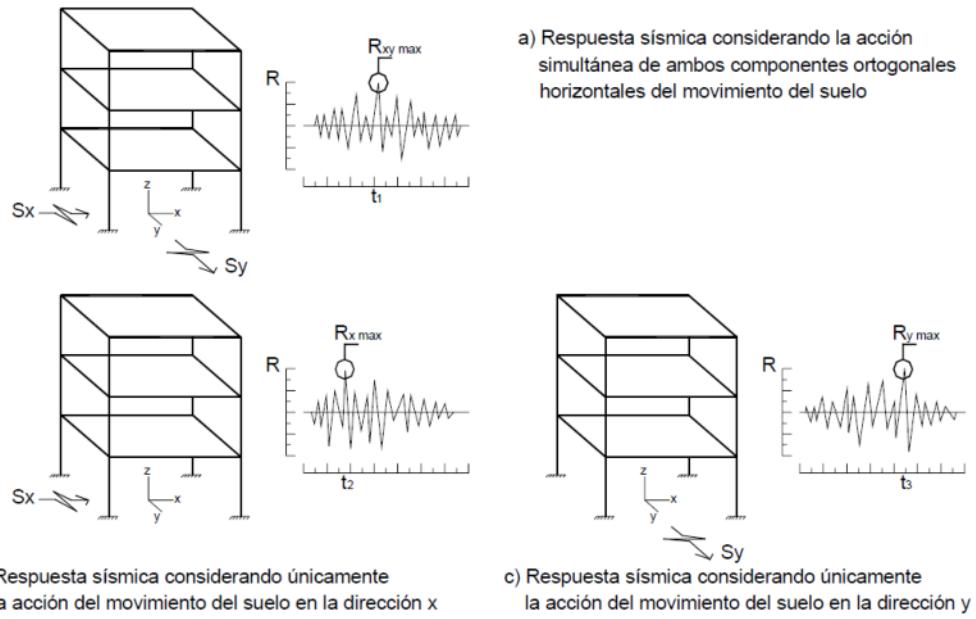


Figura 12. Respuesta sísmica Unidireccional y Bidireccional.

Fuente: (Valdés González & Ordaz Schroeder, 2008, p.92).

En el trabajo de (Lascano, 2018, p.13) se usó esta nueva metodología para combinar espectros considerando el tiempo y la dirección donde ocurren los máximos valores, es decir, se combina las respuestas en el tiempo de cada componente horizontal en cada instante de tiempo (t) por medio de la ecuación (22) para posteriormente seleccionar la máxima combinación. En la Figura 13 se exhibe la resultante $R_{xy}(t)$ de las componentes horizontales $R_x(t)$ y $R_y(t)$ en cada instante de tiempo.

$$GMax(t) = \text{Max} \left[\sqrt{R_x^2(t) + R_y^2(t)} \right] \quad (22)$$

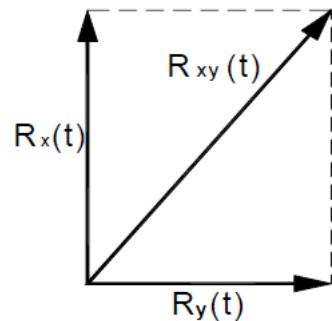


Figura 13. Respuesta ortogonal en cada instante de tiempo (t).

Fuente: (Valdés González & Ordaz Schroeder, 2008, p.94).

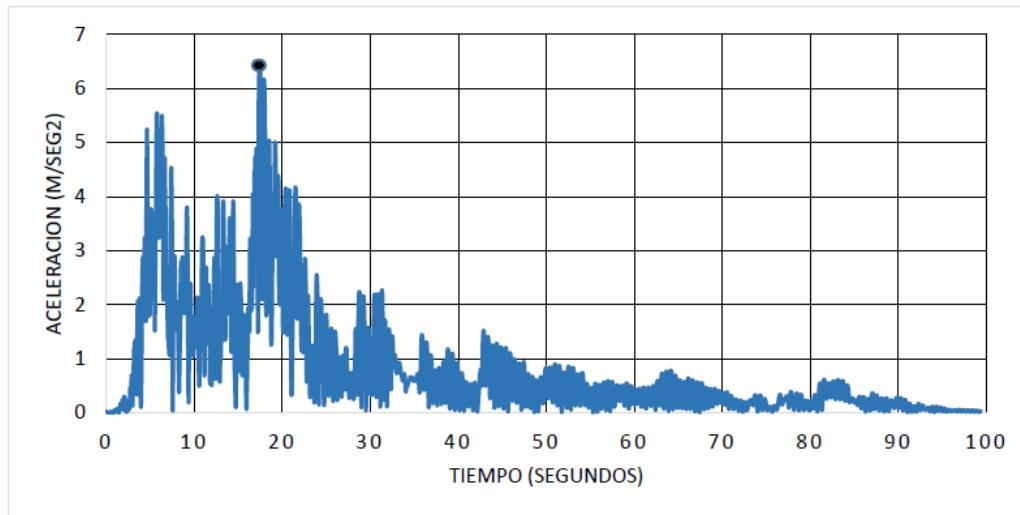


Figura 14. Respuesta de aceleración combinada mediante SRSS en el T=1 segundo.

Fuente:(Lascano, 2018, p.16).

En la Figura 14 se muestra la combinación GMax que consiste en combinar las respuestas en cada instante de tiempo para el período de 1 segundo y mediante el método SRSS, esta gráfica fue generada a partir de los registros sísmicos de la estación Chone correspondiente al terremoto de Ecuador-Pedernales 2016, “el máximo valor obtenido se encuentra alrededor de 6.97 m/seg² que se encuentra en el tiempo 18 segundos”(Lascano, 2018, p.16).

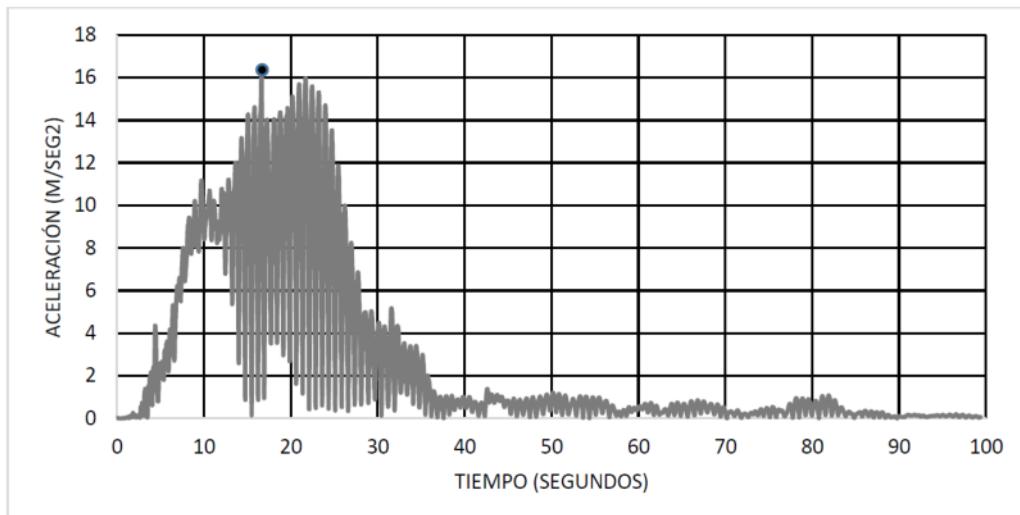


Figura 15. Respuesta de aceleración combinada mediante SRSS en el T=1.5 segundos.

Fuente:(Lascano, 2018, p.17).

En la Figura 15 se muestra la combinación de la respuesta en el tiempo correspondiente al período de 1.5 segundos y en base a los datos obtenidos de los registros sísmicos de la estación Chone perteneciente al terremoto ocurrido en Ecuador-Pedernales 2016, “el máximo valor obtenido se encuentra alrededor de 16.06 m/seg² que se encuentra en el tiempo 17 segundos”(Lascano, 2018, p.17).

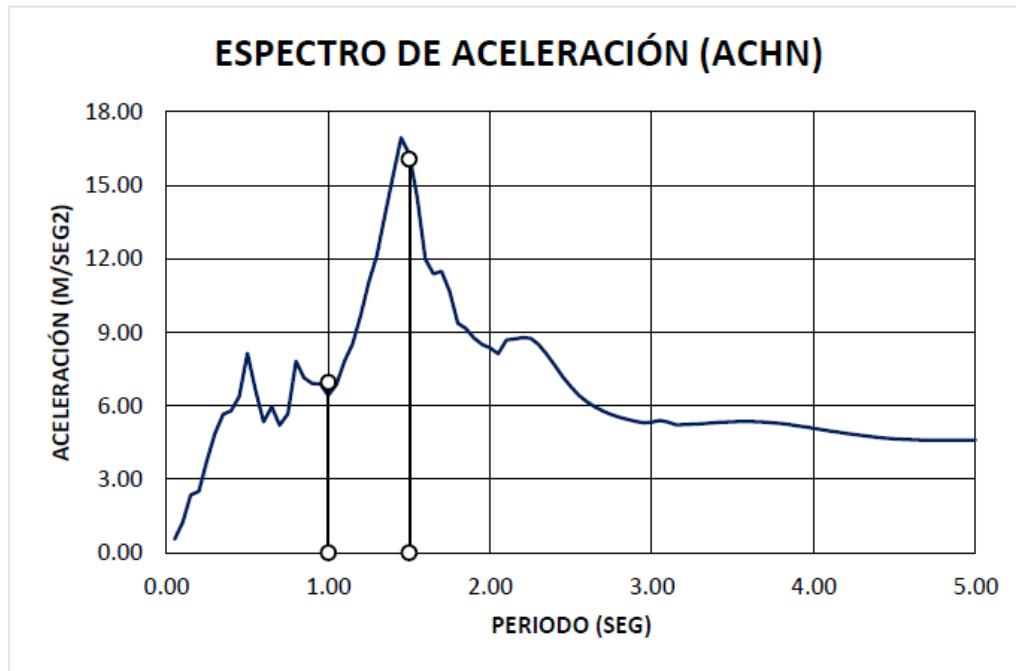


Figura 16. Espectro de respuesta del método de combinación de componentes horizontales GMax.

Fuente:(Lascano, 2018, p.17).

En la Figura 14 y Figura 15 se obtuvo los valores máximos para el período de 1 y 1.5 segundos respectivamente, es por tal razón, que se puede visualizar estos valores en el espectro de respuesta de la Figura 16 correspondiente al método de combinación GMax.

Huang, Whittaker, & Luco (2008) afirman:

Que el procedimiento para calcular la máxima y mínima demanda espectral , para un determinado período y un par de registros sísmicos se observa en la Figura 17 , ejemplo: con 5% de amortiguamiento y con un período de 1 segundo para calcular las respuestas en el tiempo de ambas componentes horizontales, se obtiene la máxima aceleración y su orientación (α) con respecto a la dirección “Y” como el punto en la órbita más alejado del origen. La mínima demanda espectral fue tomada

como el pico de la demanda espectral en la componente ortogonal, cabe resaltar que “ α ” varía en función del período.(p.322)

La Figura 17 fue obtenida del sismo “Imp. Valley-02” ocurrido en el año 1940, de la estación El centro #9 y de una magnitud de 6.95 en la escala de Richter.

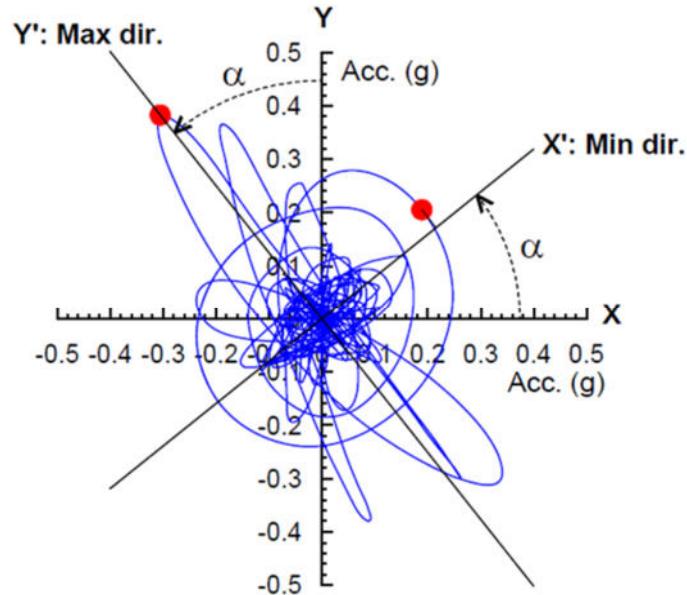


Figura 17. Órbita de aceleraciones para calcular la máxima y mínima demanda espectral

Fuente: (Huang, Whittaker, & Luco, 2008, p.322).

CAPÍTULO 3

3. Metodología

3.1. Introducción.

En este capítulo se describirá la metodología usada en el presente trabajo para el cálculo de la respuesta bidireccional de las diferentes combinaciones de registros sísmicos. Una vez obtenidas las respuestas se procede a compararlas y evaluarlas.

3.2. Registros Sísmicos.

Para este estudio, se han considerado 29 pares de registros del terremoto de Ecuador-Pedernales del 16 de Abril del 2016, y 21 pares de registros del terremoto de Chile-Maule del 27 de Febrero de 2010. Los registros del terremoto de Ecuador-Pedernales 2016 fueron obtenidos de la RENAC (Red Nacional de Acelerógrafos), específicamente del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica nacional (IG-EPN), los cuales fueron utilizados en varios trabajos de grado anteriores(Ávila, 2018; Chérrez, 2019; Lascano, 2018; Villao, 2018).

Los registros del terremoto de Chile-Maule 2010 fueron obtenidos de la página web de la “Facultad de Ciencias físicas y matemáticas de la Universidad de Chile (fcfm)”.

Para propósitos de esta investigación, se decidió trabajar por separado los registros de los eventos sísmicos antes mencionados. Para ambos grupos, los acelerogramas de las estaciones fueron ordenados y clasificados de acuerdo con el período del suelo, específicamente en función de la mayor magnitud de entre sus componentes horizontales

GRUPO 1	< 0.6 seg
GRUPO 2	0.6 a 1.25 seg
GRUPO 3	>1.25 seg

A continuación, se muestra la clasificación de los acelerogramas para cada evento sísmico:

Tabla 1. Clasificación de los registros sísmicos del terremoto de Pedernales del 16 de Abril del 2016.

ECUADOR-PEDERNALES 2016							
Nº	CIUDAD	ESTACIÓN	COMP.	PGA(g)	f(Hz)	T(s)	
1	PORTOVIEJO	APO1	EO	0,317	2,64	0,38	
			NS	0,381	2,09	0,48	
2	GUAYAQUIL	APR2	EO	0,096	2,08	0,48	
			NS	0,107	2,08	0,48	
3	SAN LORENZO	APS4	EO	0,007	2,42	0,41	
			NS	0,006	2,37	0,42	
4	SANTO DOMINGO	ASDO	EO	0,207	2,05	0,49	
			NS	0,111	1,98	0,51	
5	GUAYAQUIL	AV11	EO	0,030	3,14	0,32	
			NS	0,039	3,35	0,30	
6	LOJA	AV18	EO	0,147	1,84	0,54	
			NS	0,123	2,04	0,49	
7	ESMERALDAS	AV21	EO	0,164	2,42	0,41	
			NS	0,149	3,36	0,30	
8	SANTO DOMINGO	AMA1	EO	0,411	1,73	0,58	
			NS	0,200	1,65	0,60	
9	IBARRA	AIB1	EO	0,049	0,87	1,15	
			NS	0,058	1,03	0,97	
10		AIB2	EO	0,021	1,14	0,88	
			NS	0,033	1,25	0,80	
11	MANTA	AMNT	EO	0,402	0,91	1,10	
			NS	0,525	1,46	0,68	
12	PEDERNALES	APED	EO	1,407	1,55	0,65	
			NS	0,829	2,10	0,48	
13	ESMERALDAS	PDNS	EO	1,034	1,21	0,83	
			NS	0,942	1,78	0,56	
14	GUAYAQUIL	EPNL	EO	0,027	0,82	1,22	
			NS	0,020	1,37	0,73	
15		AGYE	EO	0,019	2,29	0,44	
			NS	0,024	1,27	0,79	
16	AMBATO	AAM2	EO	0,026	0,42	2,36	
			NS	0,036	0,49	2,04	
17	MACHALA	ACH1	EO	0,026	0,60	1,65	
			NS	0,024	0,60	1,67	
18	CHONE	ACHN	EO	0,330	0,74	1,34	
			NS	0,370	0,68	1,48	
19	CUENCA	ACUE	EO	0,036	0,71	1,41	
			NS	0,030	0,95	1,05	
20	ESMERALDAS	AES2	EO	0,154	0,70	1,44	
			NS	0,111	0,66	1,51	

21	GUAYAQUIL	AGY1	EO	0,059	0,59	1,71
22			NS	0,065	0,62	1,62
23	LATALCUNGA	ALAT	EO	0,094	0,58	1,72
			NS	0,098	0,60	1,66
24	LIBERTAD	ALIB	EO	0,032	0,74	1,34
			NS	0,028	0,53	1,88
25	LOJA	ALJ1	EO	0,042	0,52	1,91
			NS	0,040	0,87	1,15
26	SAN LORENZO	ALOR	EO	0,015	0,61	1,63
			NS	0,016	0,62	1,61
27	MILAGRO	AMIL	EO	0,026	0,57	1,74
			NS	0,027	0,42	2,41
28	OTAVALO	AOTA	EO	0,052	0,29	3,45
			NS	0,046	0,92	1,09
29	TULCÁN	ATUL	EO	0,043	0,71	1,40
			NS	0,035	0,60	1,65
			EO	0,016	0,73	1,37
			NS	0,021	1,28	0,78

Tabla 2. Clasificación de los registros sísmicos del terremoto de Chile del 27 de Febrero del 2010.

CHILE-MAULE 2010							
Nº	CIUDAD	ESTACIÓN	COMP.	PGA(g)	f(Hz)	T(s)	
1	COPIAPO	COPIAPO	EO	0,03	2,77	0,36	
			NS	0,02	2,44	0,41	
2	PAPUDO	PAPUDO	EO	0,30	3,28	0,30	
			NS	0,16	6,46	0,15	
3	LLOLLEO	LLOLLEO	EO	0,32	1,65	0,60	
			NS	0,70	4,17	0,24	
4	SANTIAGO DE CHILE	SANTIAGO CENTRO	EO	0,22	3,00	0,33	
			NS	0,18	4,89	0,20	
5		SANTIAGO MAIPU	EO	0,48	1,91	0,52	
			NS	0,56	1,93	0,52	
6		SANTIAGO PEÑALOLEN	EO	0,29	2,98	0,34	
			NS	0,30	2,78	0,36	
7		SANTIAGO PUENTE ALTO	EO	0,26	2,08	0,48	
			NS	0,27	1,70	0,59	
8	CURICO	HUALAÑE	EO	0,39	2,19	0,46	
			NS	0,39	8,54	0,12	
9	ANGOL	ANGOL	EO	0,68	5,98	0,17	
			NS	0,93	5,72	0,17	
10	VALLENAR	VALLENAR	EO	0,02	1,45	0,69	
			NS	0,02	1,65	0,61	

11	VIÑA DEL MAR	VIÑA DEL MAR CENTRO	EO	0,33	1,20	0,83	
			NS	0,22	1,59	0,63	
12		VIÑA DEL MAR EL SALTO	EO	0,35	1,20	0,83	
			NS	0,26	4,27	0,23	
13	VALPARAÍSO	VALPARAISO UTSMS	EO	0,14	1,05	0,95	
			NS	0,08	1,11	0,90	
14		VALPARAISO ALMENDRA	EO	0,22	1,18	0,85	
			NS	0,15	3,08	0,32	
15	MATANZAS	MATANZAS	EO	0,34	1,90	0,53	
			NS	0,23	1,42	0,71	
16	TALCA	TALCA	EO	0,48	2,83	0,35	
			NS	0,24	1,39	0,72	
17	CONSTITUCIÓN	CONSTITUCIÓN	EO	0,55	3,83	0,26	
			NS	0,35	1,28	0,78	
18	VALDIVIA	VALDIVIA	EO	0,14	0,84	1,19	
			NS	0,09	0,82	1,22	
19	CONCEPCIÓN	CONCEPCIÓN	EO	0,40	0,52	1,93	
			NS	0,40	2,39	0,42	
20	SANTIAGO DE CHILE	SANTIAGO FLORIDA	EO	0,24	0,64	1,56	
			NS	0,13	0,67	1,50	
21	CURICO	CURICO	EO	0,47	0,69	1,44	
			NS	0,20	1,37	0,73	

A continuación, se muestran en la Figura 18 y Figura 19 los registros de las componentes horizontales del terremoto de pedernales del 16 de Abril, obtenidos específicamente de la estación ACHN correspondiente a la ciudad de Chone.

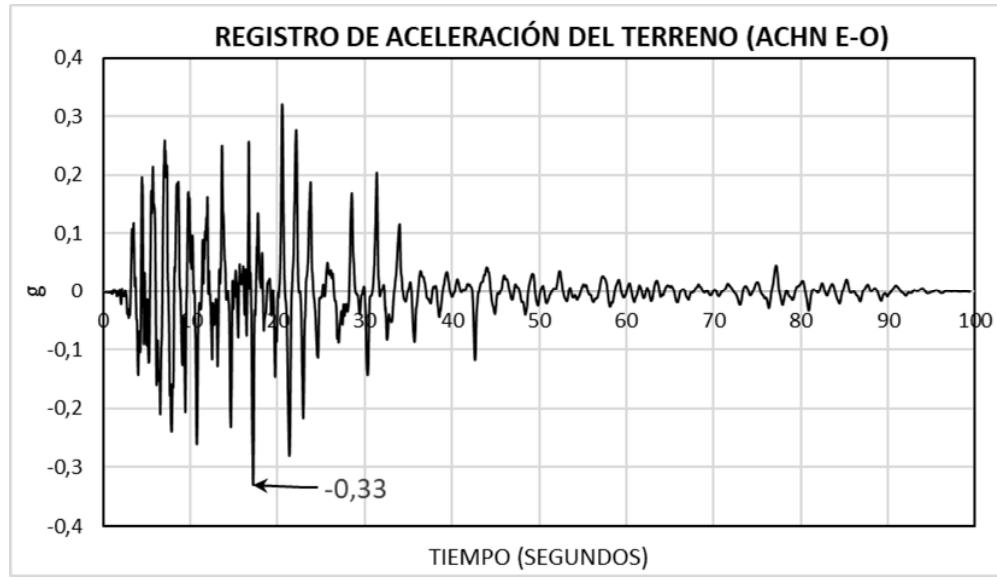


Figura 18. Registro de aceleraciones del suelo de la componente ESTE-OESTE de la estación ACHN.

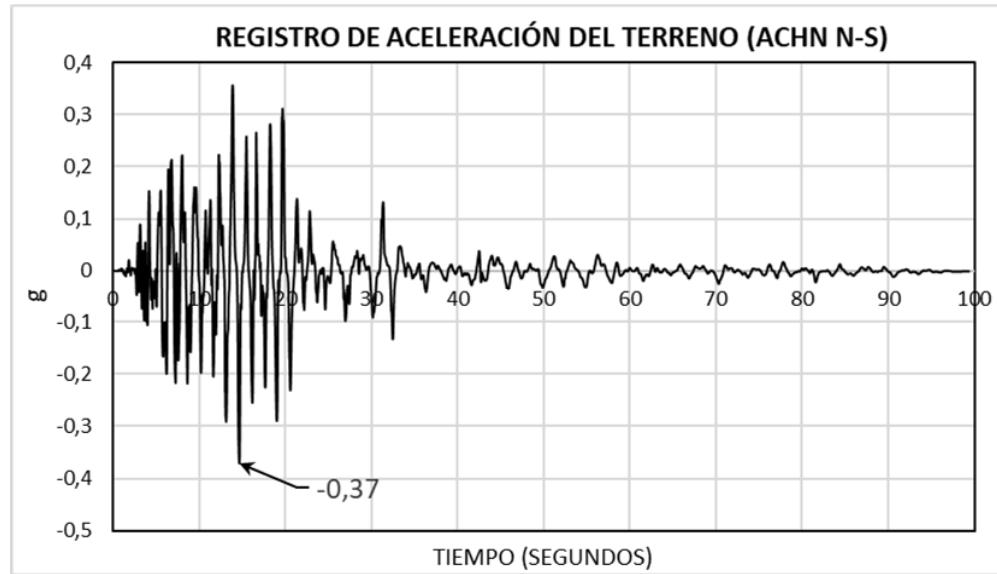


Figura 19. Registro de aceleraciones del suelo de la componente NORTE-SUR de la estación ACHN.

3.3. Espectro de respuesta de componentes horizontales originales

Se calcula la respuesta de una estructura de 1 grado de libertad de pseudo-aceleraciones para las componentes horizontales del registro sísmico, para aquello se utiliza el método de Newmark (Ver Sección 2.3) considerando un 5% de amortiguamiento.

En la ingeniería estructural, el desempeño de una estructura se establece conociendo la máxima respuesta de la estructura. Esta respuesta puede ser desplazamiento, velocidad o aceleración (o pseudo-aceleración).

Los efectos de los terremotos en las estructuras se las determina por medio del cálculo de los espectros de respuesta. Los espectros de respuesta son las respuestas máximas de estructuras de diferentes períodos naturales de vibración, para un valor de amortiguamiento (normalmente 5% del crítico) sometidas a un movimiento de suelo específico (registro de aceleración del terreno o registro del suelo).

Comúnmente, estos espectros son calculados para las dos (2) componentes horizontales de las aceleraciones del suelo capturados por los acelerógrafos en cada estación acelerográfica. Independientemente de la inclinación o dirección en la que hayan sido colocados los acelerógrafos, a estos registros y a los espectros que resulten de ellos se los denominará como “originales”.

Como ejemplo, se muestran la Figura 20 y Figura 21 que corresponden a la respuesta de pseudo-aceleraciones de las componentes horizontales originales de la estación ACHN, se calculó para una estructura con un período de vibración igual a 1s y 5% de amortiguamiento crítico.

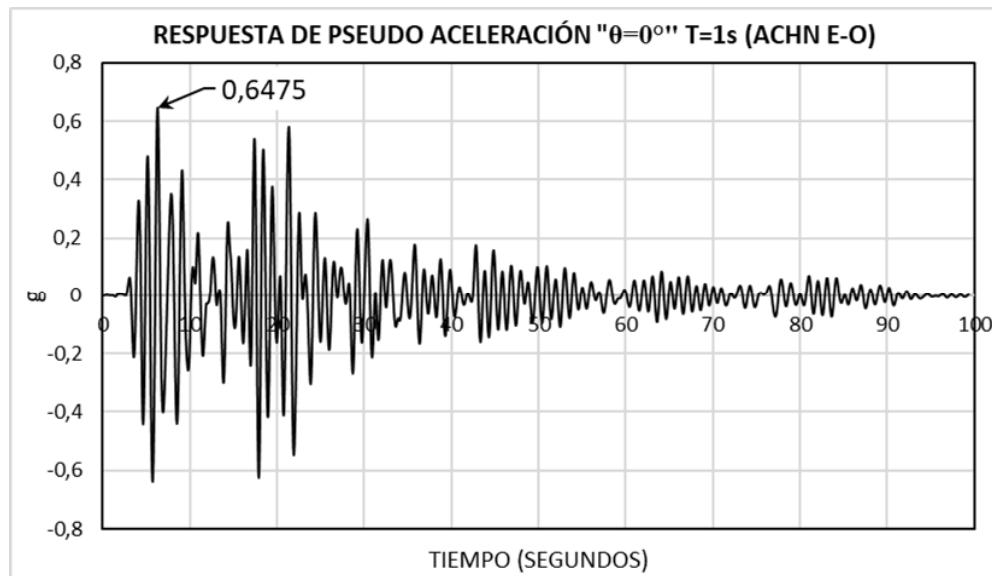


Figura 20. Respuesta de Pseudo aceleraciones de la componente ESTE-OESTE para $T=1$ segundo.

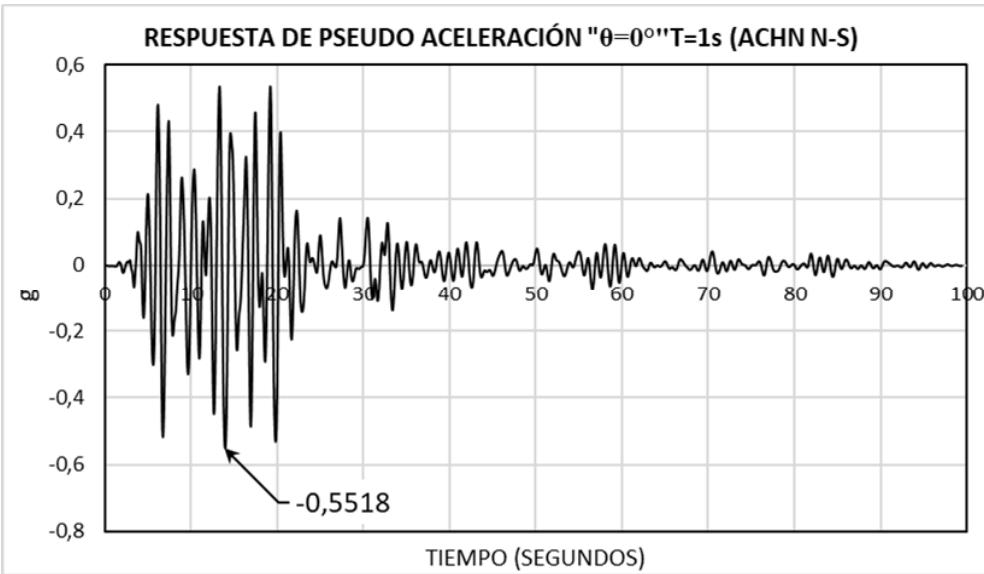


Figura 21. Respuesta de Pseudo aceleraciones de la componente NORTE-SUR para $T=1$ segundo.

En la Figura 22 y Figura 23 se muestran los espectros de respuesta de las componentes originales. En estas se puede apreciar los valores correspondientes a un periodo de 1s mostrados en la Figura 20 y Figura 21.

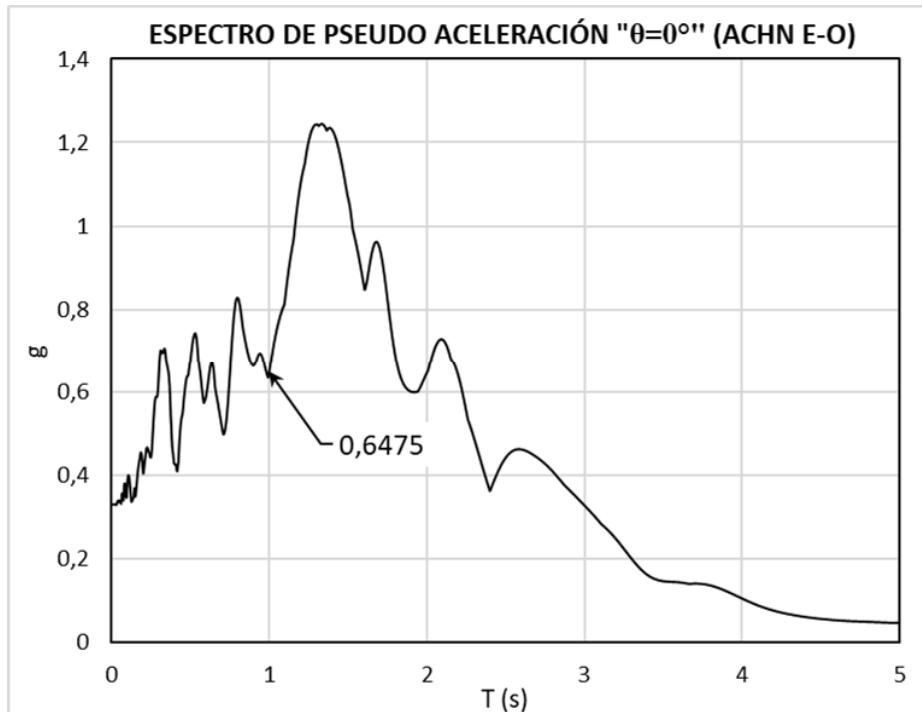


Figura 22. Espectro de respuesta de la componente original ESTE-OESTE.

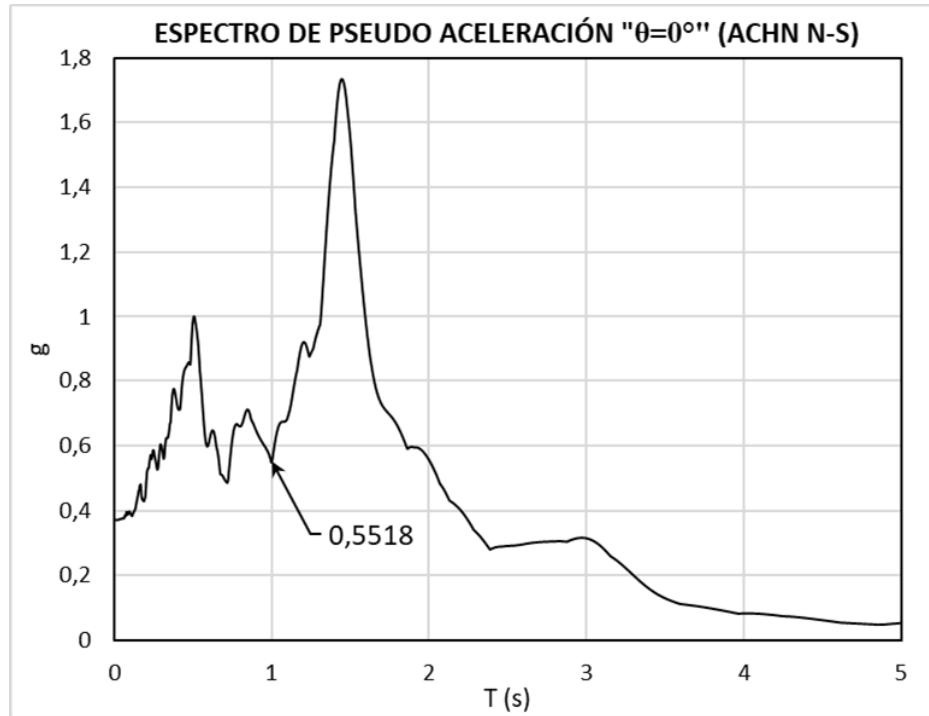


Figura 23. Espectro de respuesta de la componente original NORTE-SUR.

3.4. Métodos de combinación de componentes horizontales

3.4.1. Media Geométrica (Geometric Mean) “GM”

La combinación espectral definida como Media Geométrica “GM” corresponde a la raíz cuadrada de la multiplicación de las respuestas máximas (obtenidas del espectro) para un periodo específico (Ver Sección 2.5.1). Para esta definición se considera los espectros de los registros originales.

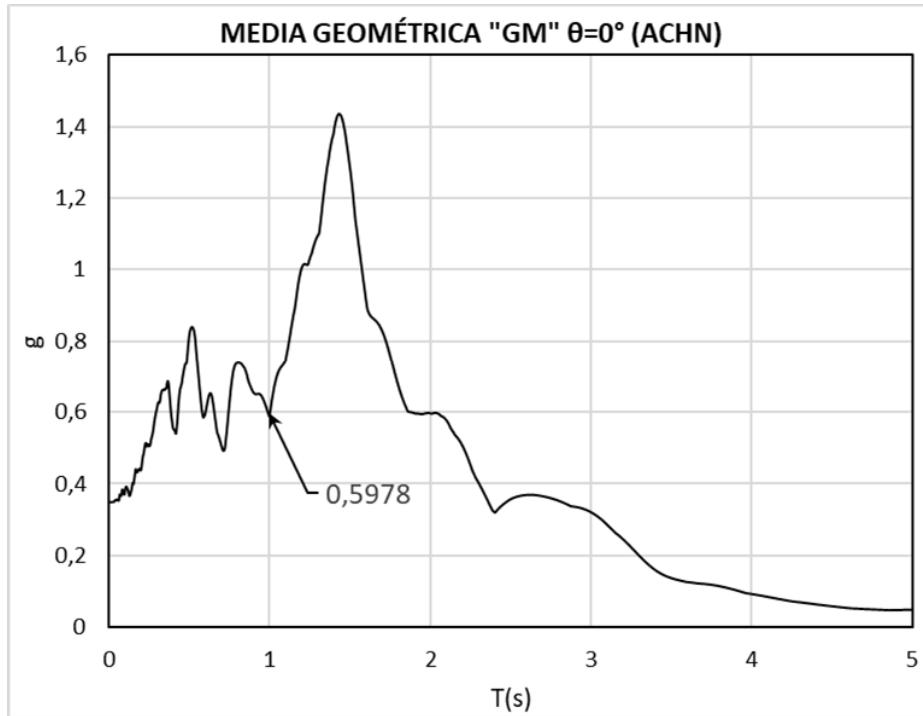


Figura 24. Media Geométrica (Geometric Mean) “GM” de las componentes horizontales originales de la estación ACHN.

En la Figura 24 se muestra el espectro de respuesta de la combinación de componentes horizontales de la media geométrica correspondiente a los registros sísmicos de la estación ACHN y del terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.

3.4.2. Media Geométrica Rotacional “GM-ROT-D y GM-ROT-I”

Dado que los resultados antes realizados son dependientes de la posición en la que se han ubicado los acelerógrafos,(Boore et al., 2006) propone estudiar los resultados girando las componentes horizontales para varias direcciones.

Primero se obtienen las aceleraciones de suelo para diferentes ángulos (de 0 a 90°) combinando los registros originales. Luego se obtienen los espectros de respuestas de cada uno de los registros obtenidos.

En las Figura 25 y Figura 26 se muestra los espectros de respuesta de las 90 rotaciones utilizadas para ambas componentes horizontales del registro ACHN.

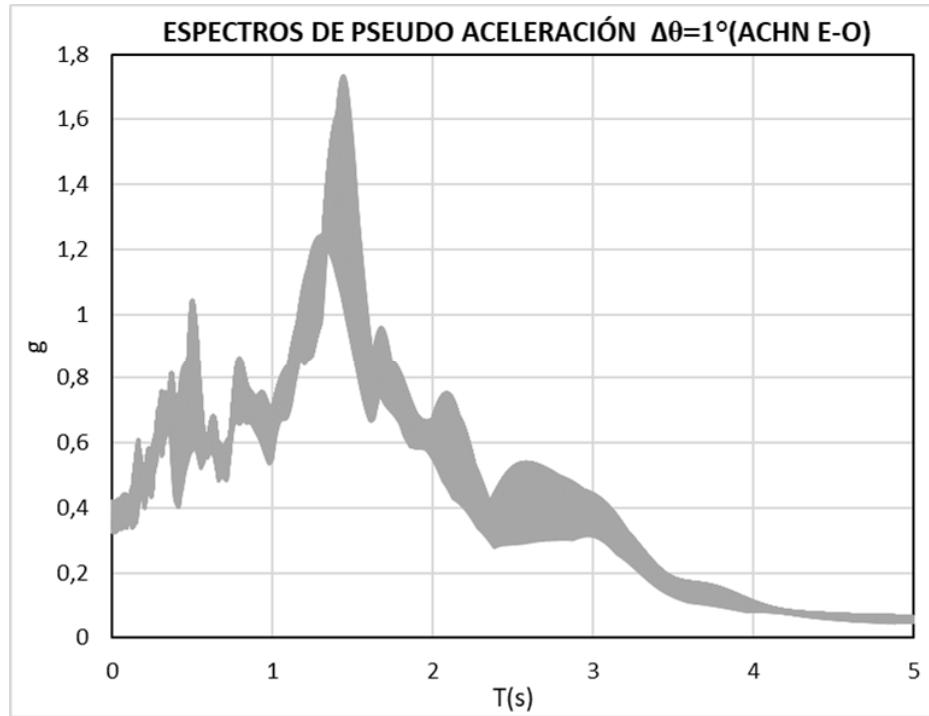


Figura 25. Espectros de respuesta de la componente ESTE-OESTE para un conjunto de ángulos.

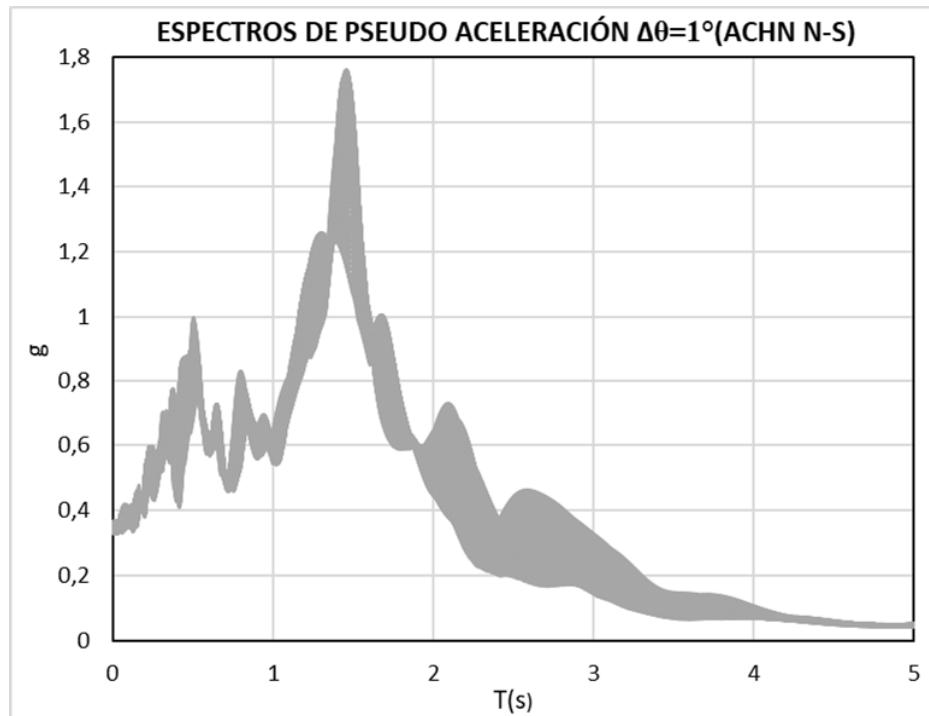


Figura 26. Espectros de respuesta de la componente NORTE-SUR para un conjunto de ángulos.

Finalmente se calcula la media geométrica de los espectros para cada ángulo en estudio. En la Figura 27, se muestran los espectros “GM” de todos los ángulos considerados. Se decidió graficar los resultados con una sombra gris, debido a que las variaciones en las componentes de los registros fueron tan pequeñas que no se apreció la diferencia entre los valores de cada espectro.

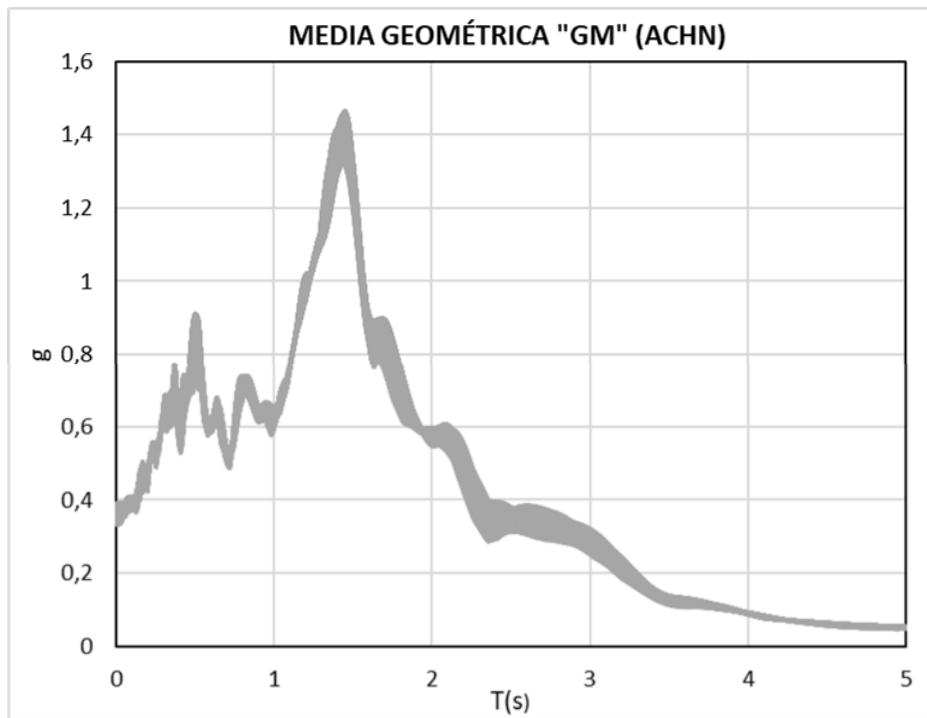


Figura 27. Combinación de las respuestas esenciales de ambas componentes horizontales mediante el método de la media Geométrica (GM)

Con el nuevo set de resultados, (Boore et al., 2006) propone 2 nuevas formas de definir los espectros: RotD y Rot-I (Ver sección 2.5.2 y 2.5.3).

3.4.3. GMRotDpp

Para obtener la medida del GMRotDpp, se procede a ordenar de menor a mayor los valores de la media geométrica “GM”, para los diferentes ángulos, en función del período. Al escoger el percentil deseado (pp) se toma el valor del percentil de la lista ordenada de los valores de la media geométrica “GM”. Es decir, “los percentiles 0, 50 y 100, representan el mínimo, medio y máximo valor de la media Geométrica “GM” para un periodo T”(Boore et al., 2006, p.1505) .

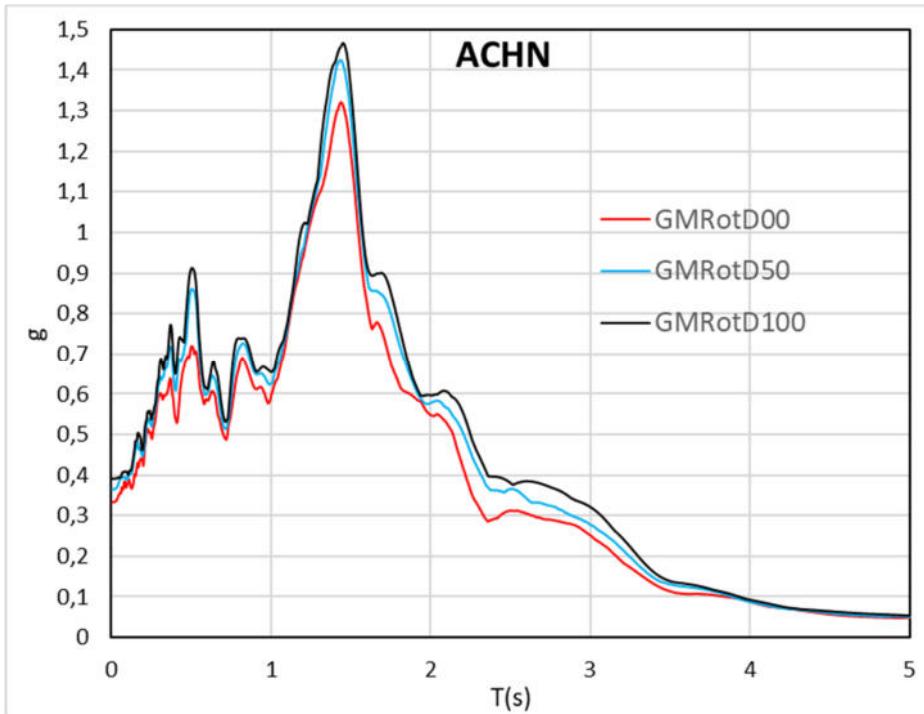


Figura 28. Combinación GM de las respuestas espectrales para los percentiles 0,50 y 100 de la estación ACHN.

3.4.4. GMRotIpp

Para obtener el GMRotIpp, partimos del espectro GMRotDpp. Cada espectro GM, correspondiente a un ángulo de giro, es evaluado al GMRotDpp por medio de una función de penalización (Función Penalty). El espectro GM del ángulo que haya obtenido el mínimo valor de la función de penalización, es considerado como el GMRotIpp (Boore et al., 2006, p.1507).

En la Figura 29 se muestra las medias geométricas para 100 períodos espaciados 0.05 segundos a 5 segundos, normalizados por el valor del percentil 50 para cada período (GMRotD50), en función del ángulo de rotación.

En la Figura 30 se muestra la “Función de Penalización” construida a partir de las 100 medias geométricas normalizadas. Cabe destacar que el mínimo valor de esta función proporciona el ángulo de rotación independiente del período ($\theta=62^\circ$) utilizado para calcular la media geométrica que se llama “GMRotI50”.

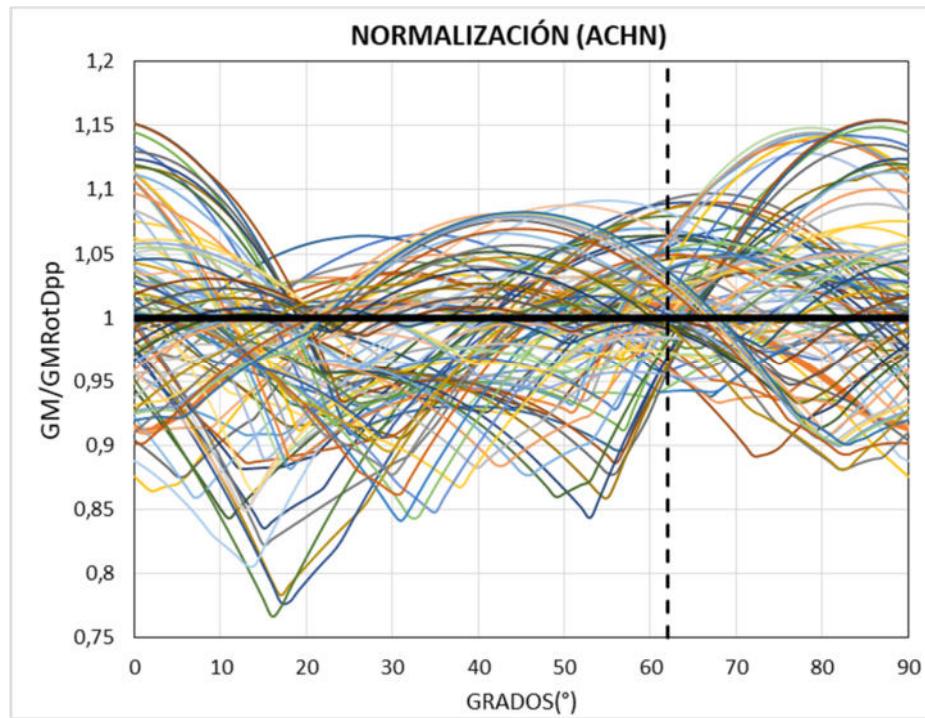


Figura 29. Cálculo de la normalización de $GM/GMRotDpp$ para un percentil igual a 50 de la estación ACHN.

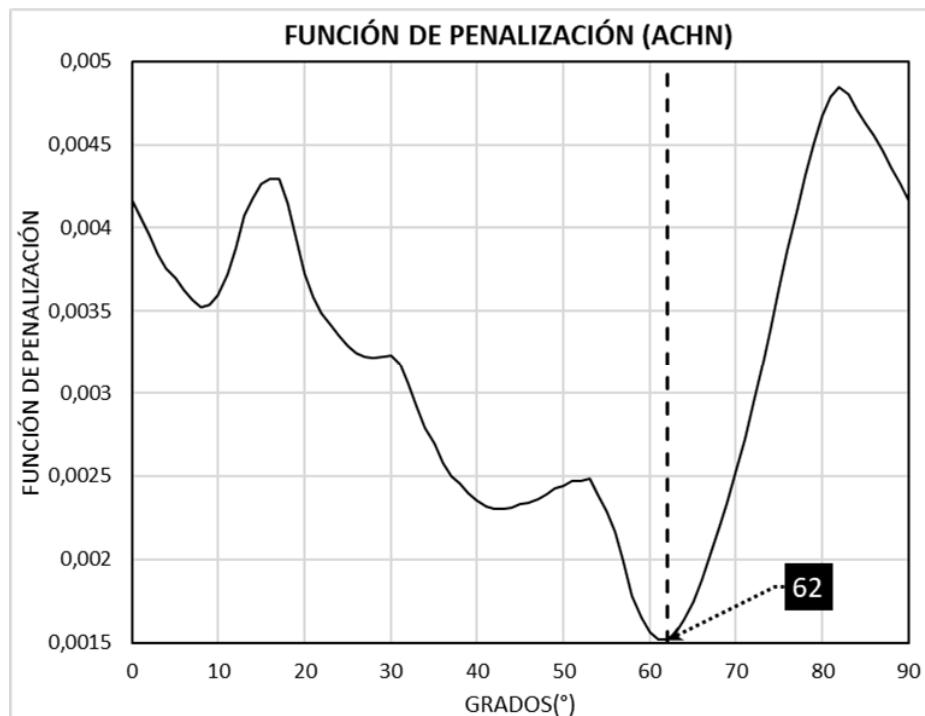


Figura 30. Cálculo de la Función de Penalización para un percentil igual a 50 de la estación ACHN.

La Figura 31 muestra el espectro GM para los registros correspondientes al ángulo de 62° respecto a las componentes originales. De acuerdo con la teoría del GMRotIpp, este espectro GM, es aquel que representa mejor al GMRotDpp, siendo este obtenido de un ángulo específico con respecto a los registros originales.

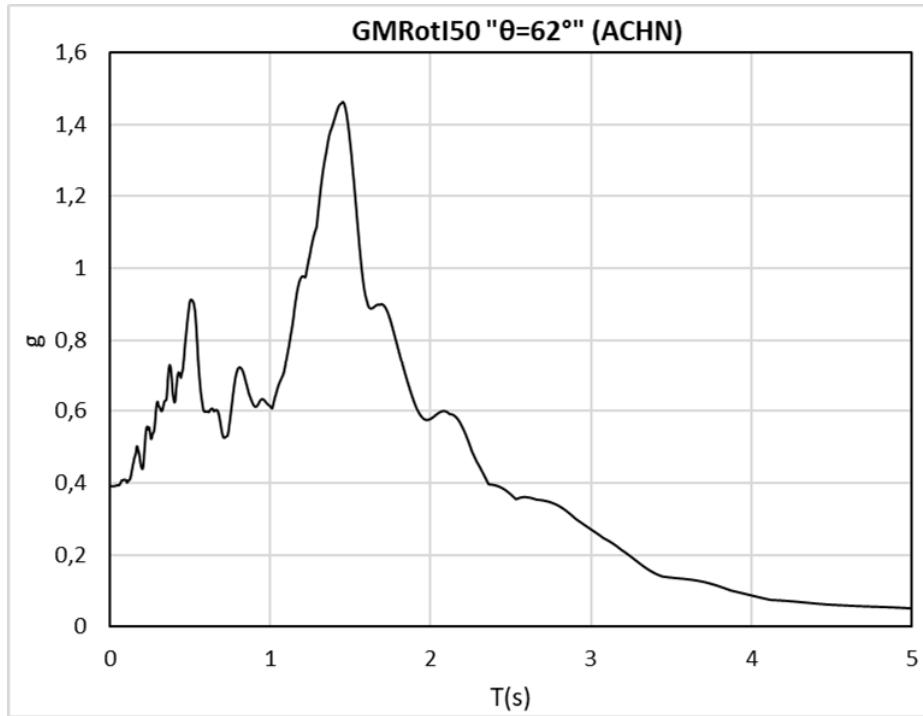


Figura 31. Combinación GM de las respuestas espectrales para un percentil igual a 50 de la estación ACHN.

3.4.5. SRSS

La combinación espectral SRSS se obtiene por medio de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los valores en cada periodo de los espectros originales.

En la Figura 32 se muestra la combinación SRSS para los registros sísmicos de la estación ACHN.

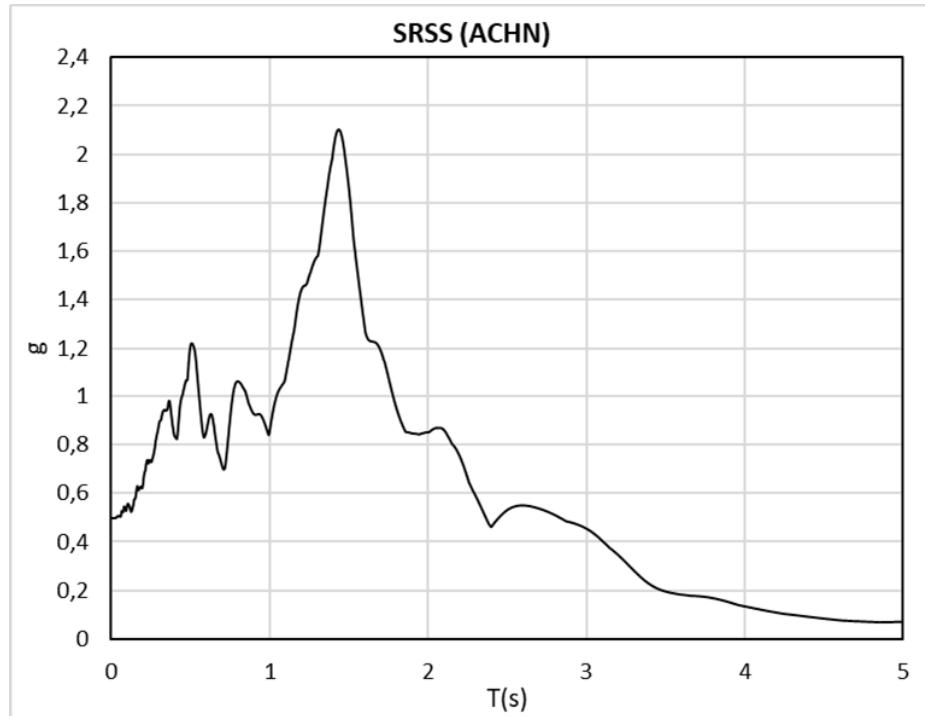


Figura 32. Combinación SRSS de las respuestas espectrales de la estación ACHN.

3.4.6. GMAX

Para cada paso de tiempo, se calcula la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las respuestas de aceleración de las dos componentes horizontales. De esta forma se obtiene la respuesta bidireccional de la estructura en el tiempo y se determina la máxima respuesta en ocurrida en cualquier dirección (Lascano, 2018, p.16).

En la Figura 33 se muestra el espectro de respuesta de la combinación de componentes horizontales GMax correspondiente a los datos obtenidos de la estación ACHN perteneciente al terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.

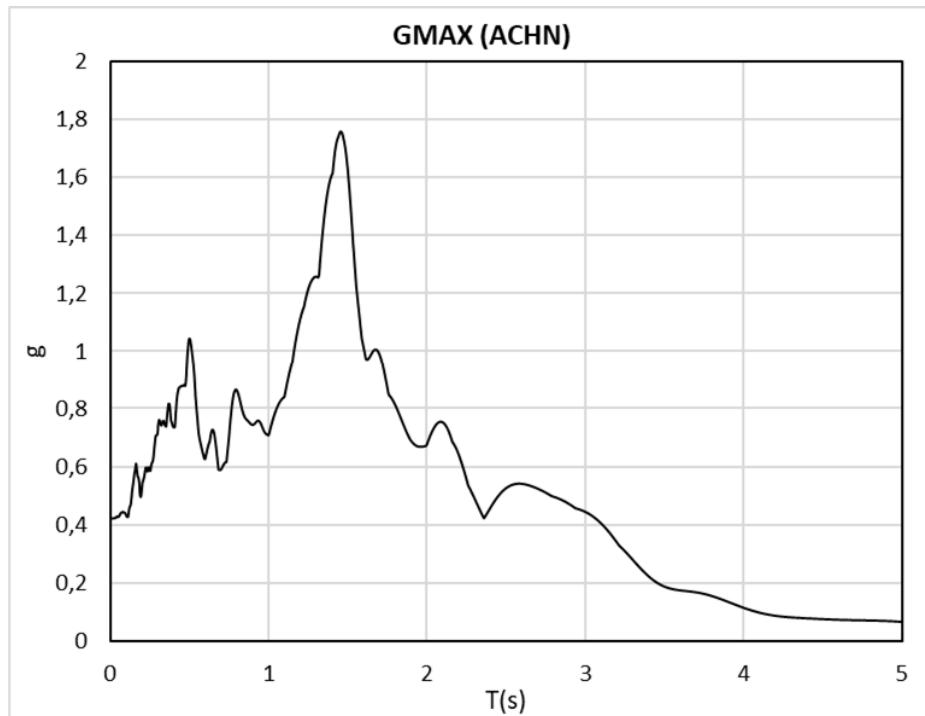


Figura 33. Combinación espectral GMax de la estación ACHN.

CAPÍTULO 4

4. Resultados

En este capítulo se analizarán y compararán los resultados del cálculo de la combinación de componentes horizontales de registros sísmicos usando los métodos mencionados en los capítulos anteriores.

Primero se estudiarán los resultados obtenidos de las combinaciones GM, GMRotDpp y GMRotIpp. Luego se compararán los resultados obtenidos para las combinaciones GMax, GM, GMRotDpp, GMRotIpp y SRSS, con el fin de identificar los casos en los cuales se presentan las mayores y menores diferencias entre ellos. Finalmente, se estudiará las diferencias entre las combinaciones GM y GMax para así determinar factores de conversión y comparar estos con los propuestos por la ASCE7-16.

Los resultados obtenidos para todos los registros considerados (29 del Terremoto de Ecuador-Pedernales y 21 del Terremoto de Chile-Maule 2010) se muestran en los Anexos 7.1 y 0. En esta sección se mostrarán solo aquellos resultados que se consideran más relevantes para los objetivos de este trabajo de grado.

4.1. Evaluación entre GM, GMRotDpp y GMRotIpp

En el Anexo 7.1.1 y Anexo 7.2.1 se muestran los valores de los espectros GM para diferentes ángulos de los registros de Ecuador y Chile, respectivamente. En las gráficas se muestran los mínimos (RotD00) y máximos (RotD100) con color negro y rojo, respectivamente, y los valores intermedios mediante una sobra gris.

Se puede observar que la mayoría de los casos los espectros RotD00 y Rot100 son muy cercanos, sin importar el periodo de la estructura analizada, lo que implicaría que las respuestas máximas son, de alguna manera, independientes de la dirección en que fueron capturados los registros.

En algunos casos como en los registros de Concepción, Matanzas, Valparaíso Almendra para sismos de Chile, y ALIB y ALOR para sismos de Ecuador se

encontraron franjas grises de gran espesor, lo que evidenciaría una gran variación según la inclinación del acelerómetro.

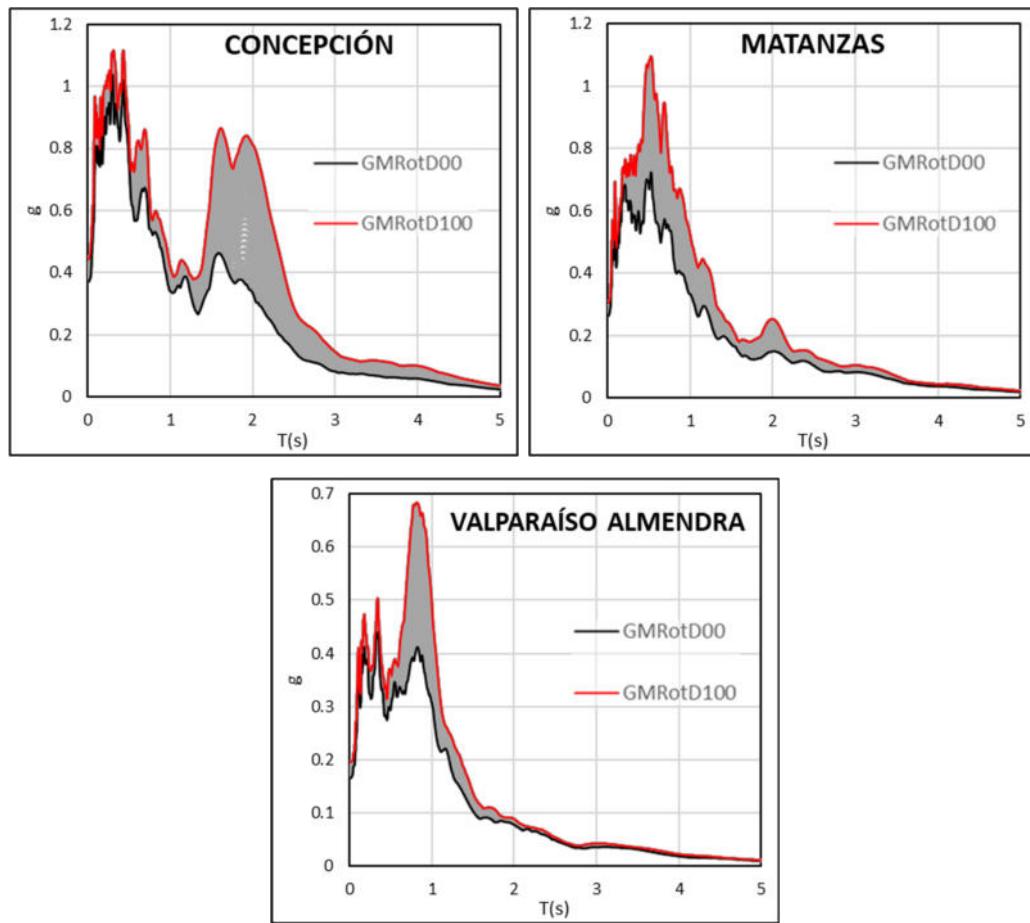


Figura 34. Registros sísmicos más representativos del terremoto de Chile-Maule 2010.

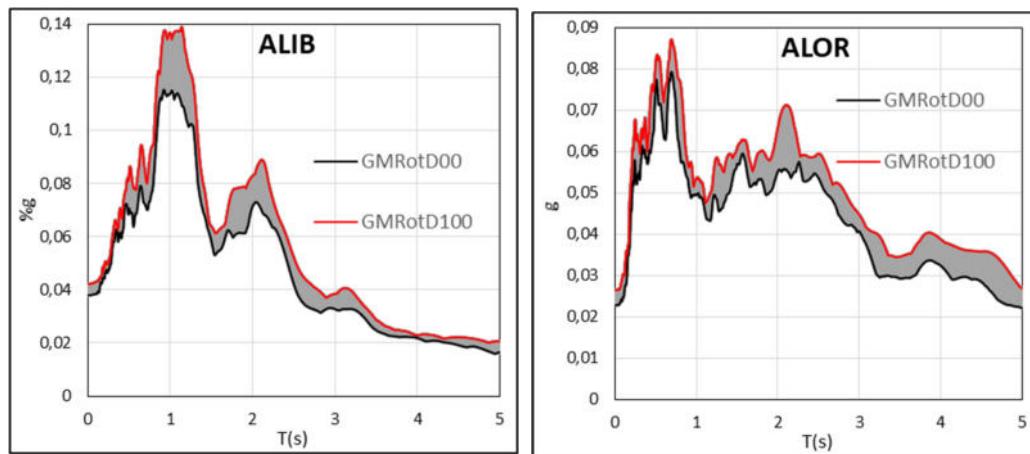


Figura 35. Registros sísmicos más representativos del terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.

En los Anexos 7.1.2 y 7.2.2 se muestran las comparaciones de los espectros GM, GMRotD50 y GMRotI50. Aquí se puede notar que para los registros que mostraron grandes diferencias entre los espectros GMRotD00 y GMRotD100, los valores del espectro GMRotD50 y GMRotI50 presentan grandes diferencias con respecto al espectro GM en el caso de los registros chilenos, pero no se muestra así en el caso de los registros de Ecuador.

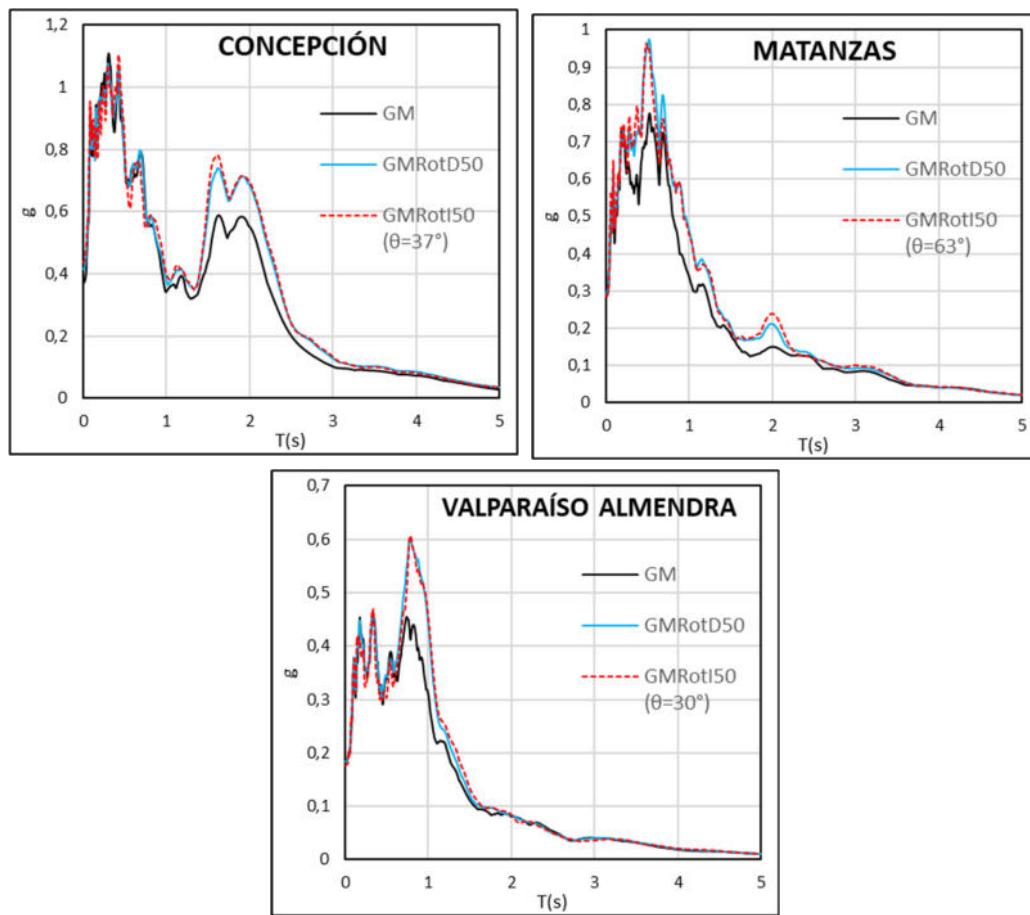


Figura 36. Resultados de los métodos GM, GMRotD50 y GMRotI50 de los registros sísmicos más representativos del terremoto de Chile-Maule 2010.

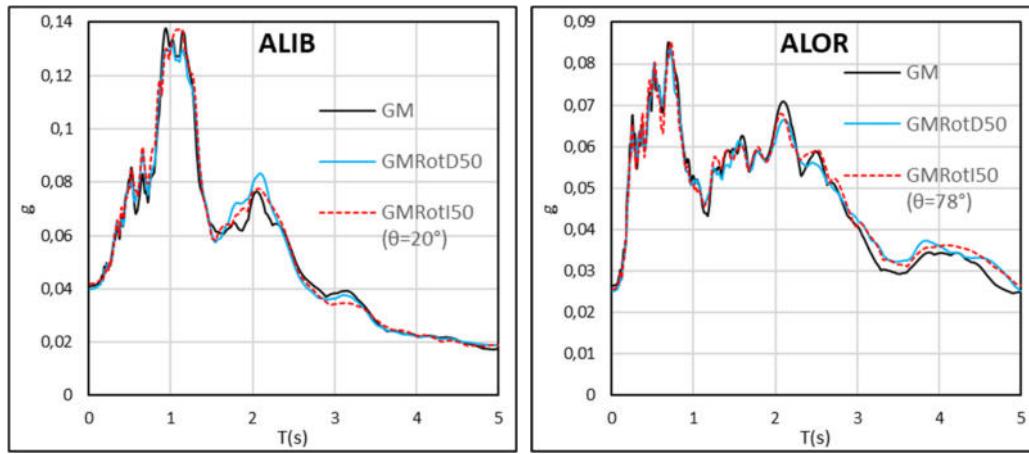


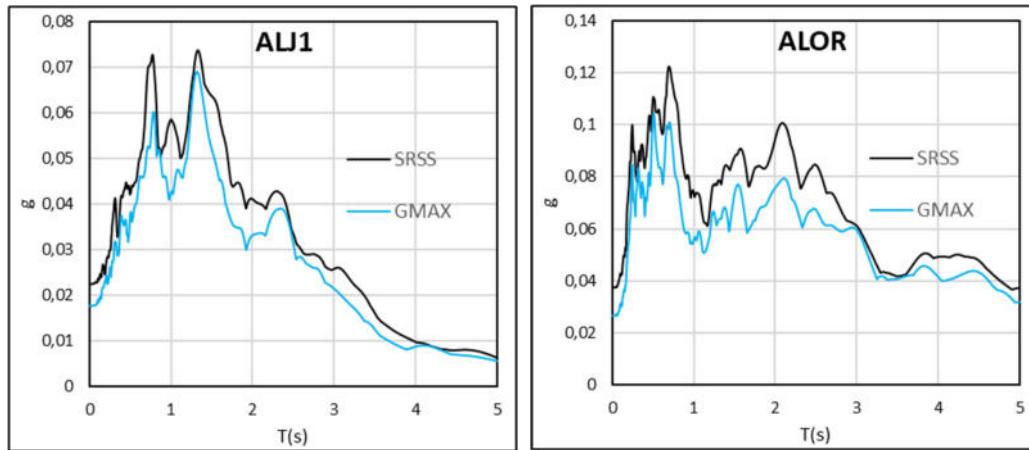
Figura 37. Resultados de los métodos GM, GMRotD50 y GMRotI50 de los registros sísmicos más representativos del terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.

4.2. Evaluación entre SRSS y GMAX

A diferencia de los espectros GM, GMRotDpp y GMRotIpp, los cuales buscan promediar la respuesta obtenida de los espectros, las combinaciones SRSS y GMax buscan determinar la respuesta máxima en cualquier dirección.

En los Anexos 7.1.5 y 7.2.5 se muestran la comparación de los registros del sismo de Chile 2010 y Pedernales 2016, respectivamente. Estas graficas son similares a las obtenidas por Lascano (2018) solo que el método RMT equivale al GMax.

En general, para los registros chilenos se nota poca diferencia entre los resultados obtenidos para SRSS y los obtenidos para GMax. Sin embargo, para los registros de Pedernales 2016: ALJ1, ALOR, y AOTA se pude notar más diferencias.



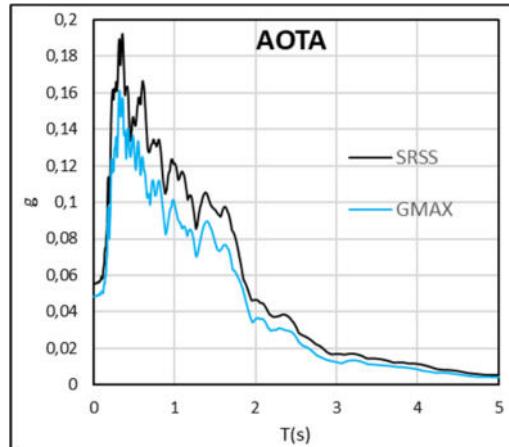


Figura 38. Resultados de los métodos SRSS y GMax de los registros sísmicos más representativos del terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.

4.3. Evaluación entre GM y GMAX

En esta sección se busca comparar dos métodos distintos de combinar componentes horizontales, el GM promedia las máximas respuestas espectrales ocurridas en distintos tiempos, mientras que el GMax determina las respuestas máximas ocurridas en tiempos iguales. En los Anexos 7.1.4 y 7.2.4 se muestran la comparación de los registros del sismo de Chile 2010 y Pedernales 2016, respectivamente.

En general, para los registros chilenos se nota poca diferencia entre los resultados obtenidos para SRSS y los obtenidos para GMax. Sin embargo, para los registros de Pedernales 2016: ALJ1, ALOR, y AOTA se pudo notar más diferencias.

Se encontraron grandes diferencias en los registros de Concepción, Matanzas, Valparaíso Almendra, Constitución y Viña el Salto para sismos de Chile. En contraste, en los registros de Ecuador ACH1, ALJ1, AGY1 y ACUE se encontraron una menor diferencia entre los resultados.

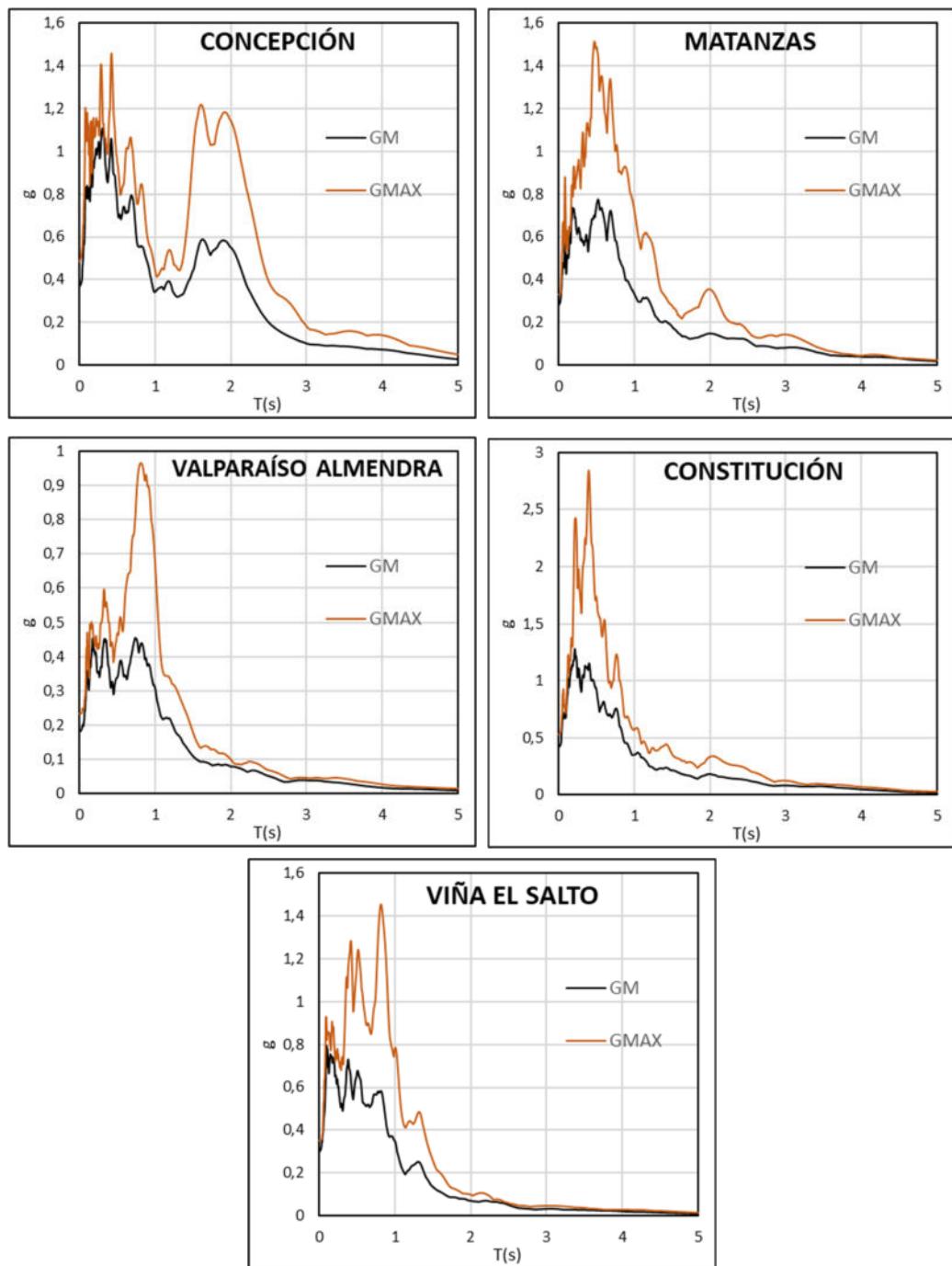


Figura 39. Resultados de los métodos GM y GMax de los registros sísmicos más representativos del terremoto de Chile-Maule 2010.

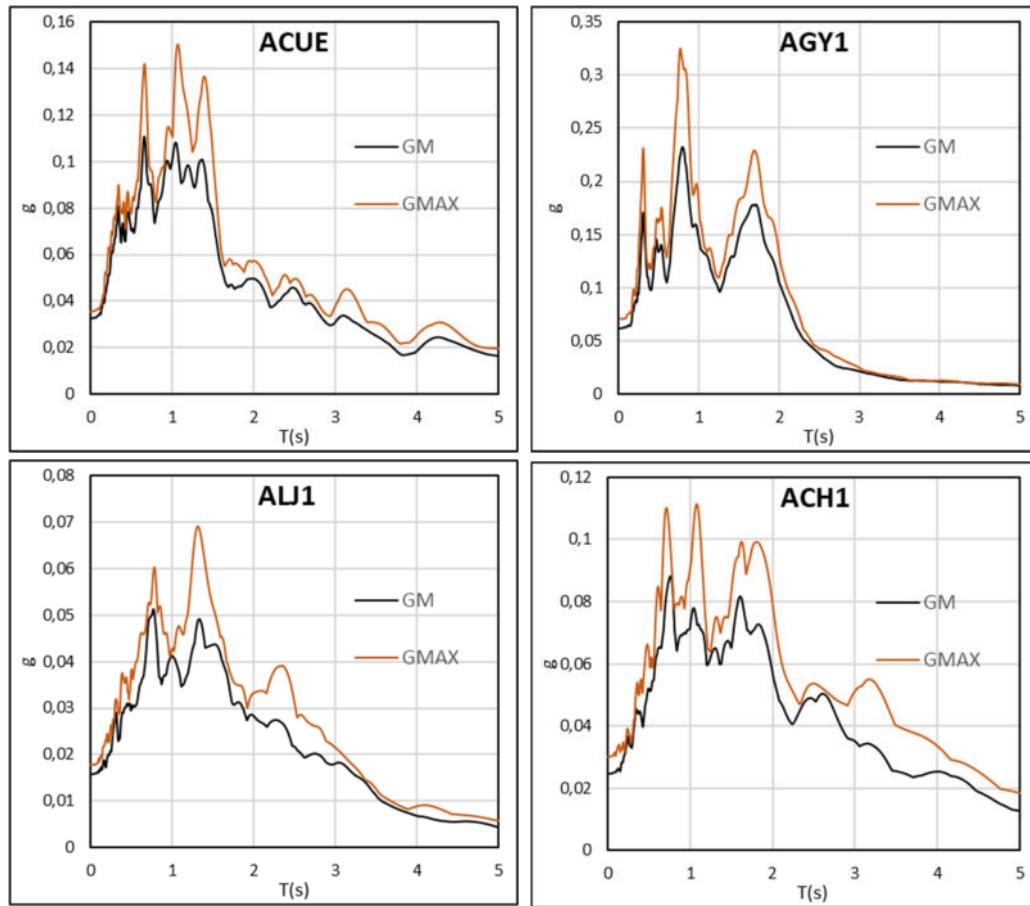


Figura 40. Resultados de los métodos GM y GMax de los registros sísmicos más representativos del terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.

4.4. Evaluación entre GM, SRSS y GMax

Las similitudes o diferencias entre los espectros SRSS y GMax pueden ser observadas y explicadas de mejor manera comparando todos los espectros estudiados en este trabajo: espectro de componentes originales (NS y EO), GM, SRSS GMax. Las gráficas para los registros de Chile 2010 y Pedernales 2016 se muestran en los Anexos 7.1.3 y Anexo 7.2.3, respectivamente. En la Figura 41 y Figura 42 no se han incluido los espectros GMRotDpp y GMRotIpp.

De los resultados obtenidos se ha identificado 2 casos de análisis: cuando las máximas respuestas (espectros) de las componentes originales son similares y cuando estas son muy diferentes. Estos 2 casos se dan, por ejemplo: para

- La estación ACH1 del Sismo de Ecuador-Pedernales 2016; el primero para un periodo de 2,68 seg y el segundo para un periodo de 1,085seg (ver Figura 41).
- La estación Valdivia del Sismo de Chile-Maule 2010; el primero para un periodo de 1.18 seg y el segundo para un periodo de 1,55 seg (ver Figura 42).

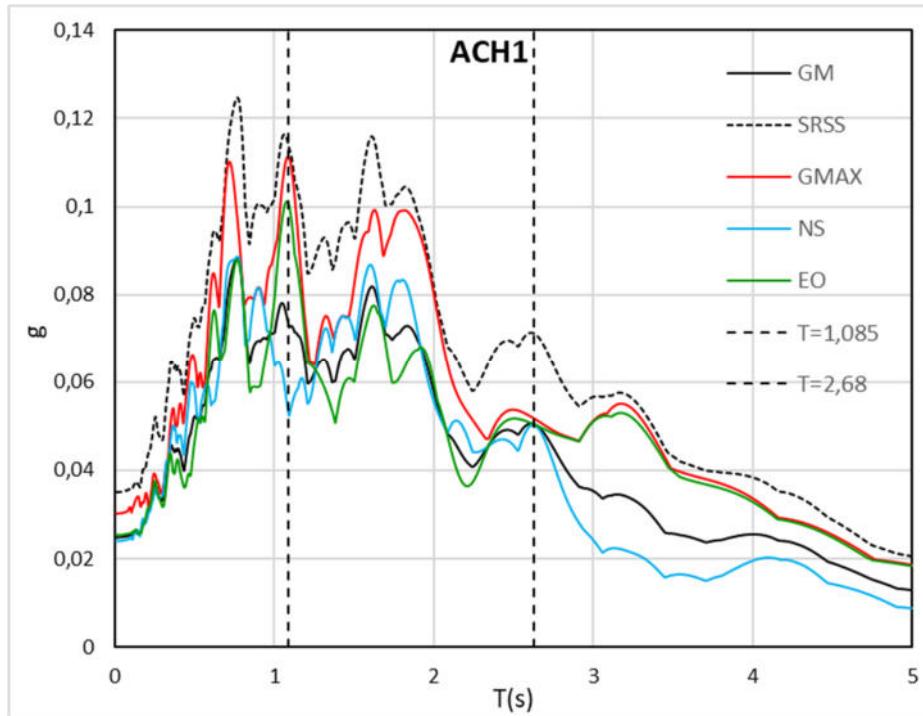


Figura 41. Resultados de los métodos GM, SRSS, GMax perteneciente a la estación ACH1 del terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.

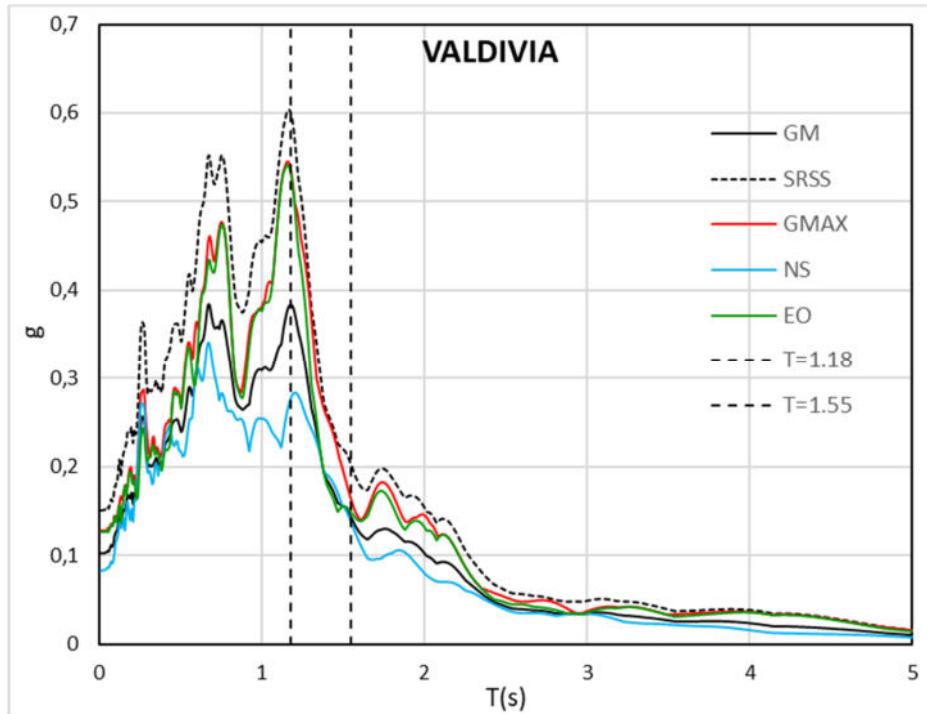


Figura 42. Resultados de los métodos GM, SRSS, GMax perteneciente a la estación Valdivia del terremoto de Chile-Maule 2010.

4.5.Casos donde ocurren respuestas similares entre las componentes horizontales

En el caso de la respuesta espectral para el registro ACH1 a un periodo de 2.68seg y para el registro Valdivia a un período de 1.55seg, se puede notar que las componentes originales (NS celeste, y EO verde) son muy similares. En esta situación, resulta un poco evidente que la combinación GM también sea similar ya que es un “promedio geométrico” de las 2 respuestas. Por otro lado, se observa que el valor correspondiente al GMax también es similar a las 3 respuestas mencionadas anteriormente, y todas estas son muy diferentes a los resultados de la combinación SRSS.

Para analizar de manera más profunda estos casos, se decidió estudiar ambos registros sísmicos (ACH1 y Valdivia), considerando la respuesta elástica de una estructura de 1 grado de libertad, con amortiguamiento crítico del 5%, y con los períodos antes mencionados ($T=2,68\text{seg}$; $T=1,55\text{seg}$), cabe mencionar que este procedimiento se lo realiza simultáneamente a las componentes EO y NS de los registros sísmicos.

En la Figura 43 y Figura 44 se muestra la respuesta de pseudo aceleración en color gris. Los círculos de la gráfica representan a las combinaciones estudiadas (originales

NS y EO, GM, GMax y SRSS) siendo el radio de estos igual al valor mostrado en los espectros.

En el caso de la Figura 43, para el registro sísmico de la estación ACH1(Ecuador-Pedernales 2016) se obtuvo la respuesta máxima de la estructura de un grado de libertad que resultó igual a 0.048g para la dirección NS y 0.0497g para la dirección EO. Por ello, el valor de GM y GMRotD50 resultaron parecidos, en específico a 0.0488g y 0.0457g respectivamente. Sin embargo, aplicando la metodología para obtener el valor GMax este resultó igual a 0.0506g; se puede apreciar con gran notoriedad que el valor del SRSS (0.069g) tiene una gran diferencia con los demás métodos para este tipo de casos en particular.

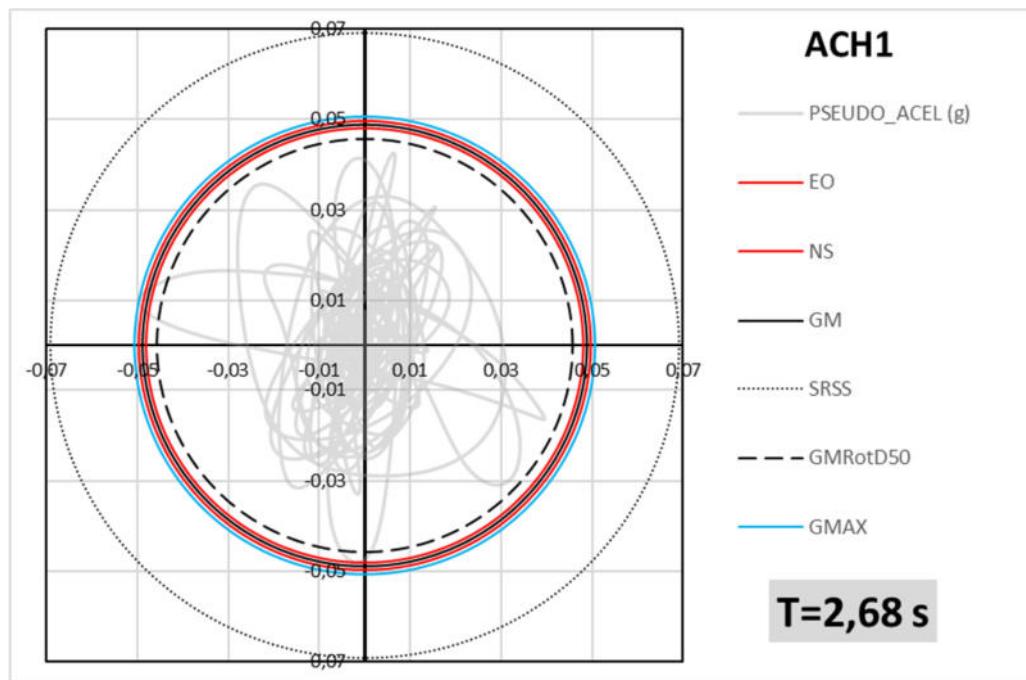


Figura 43. Combinaciones espectrales para $T=2.68$ seg de la estación ACH1 del terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.

En el caso de la Figura 44, para el registro sísmico de la estación Valdivia (Chile-Maule 2010) se obtuvo la respuesta máxima de la estructura de un grado de libertad que resultó igual a 0.1557g para la dirección NS y 0.1553g para la dirección EO. Por ello, el valor de GM y GMRotD50 resultó igual a 0.1555g y 0.1621g respectivamente. Sin embargo, aplicando la metodología para obtener el valor GMax este resultó igual a 0.1936g; se puede apreciar una diferencia del valor SRSS (0.219g) con respecto a los demás métodos para este tipo de casos en particular.

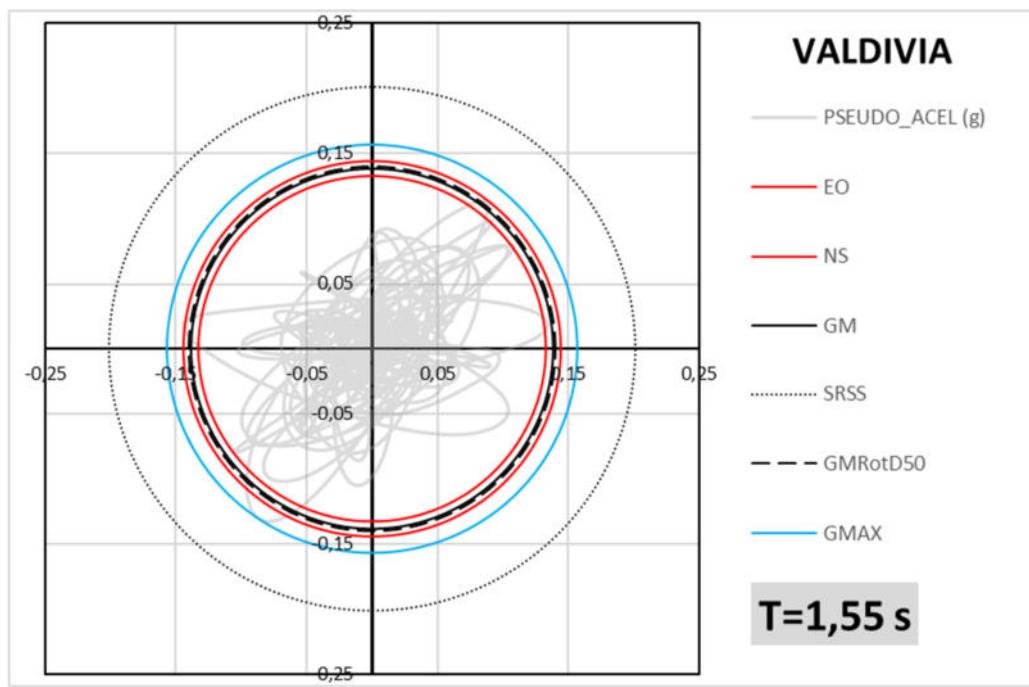


Figura 44. Combinaciones espectrales para $T=2.68$ seg de la estación Valdivia del terremoto de Chile-Maule 2010.

En la Figura 43 y Figura 44 se puede apreciar que “la respuesta de Pseudo aceleraciones se asemeja a una circunferencia y las máximas respuestas de cada dirección coinciden con los ejes NS y EO con los cuales fue alineado el acelerógrafo”(Lascano, 2018, p.44).

En base a los resultados obtenidos se puede manifestar que el método SRSS genera un valor irreal, dado que sobreestima las respuestas máximas de las componentes horizontales.

4.6.Casos donde ocurren las mayores diferencias entre las componentes horizontales

En el caso de la respuesta espectral para el registro ACH1 a un periodo de 1,085seg y para el registro Valdivia a un período de 1.18seg, se puede notar que las componentes originales (NS celeste, y EO verde) son muy diferentes. En esta situación, resulta claro que la combinación GM estará posicionada a la mitad de las componentes horizontales dado que es un “promedio geométrico” de las 2 respuestas. Por otro lado, se observa que los valores correspondientes al SRSS y GMax son similares pero que en cambio

presentan una gran dispersión con respecto a las 3 respuestas mencionadas anteriormente.

En el caso de la Figura 45, para el registro sísmico de la estación ACH1(Ecuador-Pedernales 2016) se obtuvo la respuesta máxima de la estructura de un grado de libertad que resultó igual a 0.053g para la dirección NS y 0.1g para la dirección EO. Por ello, el valor de GM y GMRotD50 resultó igual a 0.073g y 0.0808g respectivamente. Sin embargo, aplicando la metodología para obtener el valor GMax este resultó igual a 0.111g, mientras que el valor del SRSS resultó igual a 0.114g; se puede comprobar entonces que para este tipo de casos en particular: en el cual las componentes difieren en magnitud, el valor del SRSS y GMax son muy parecidos.

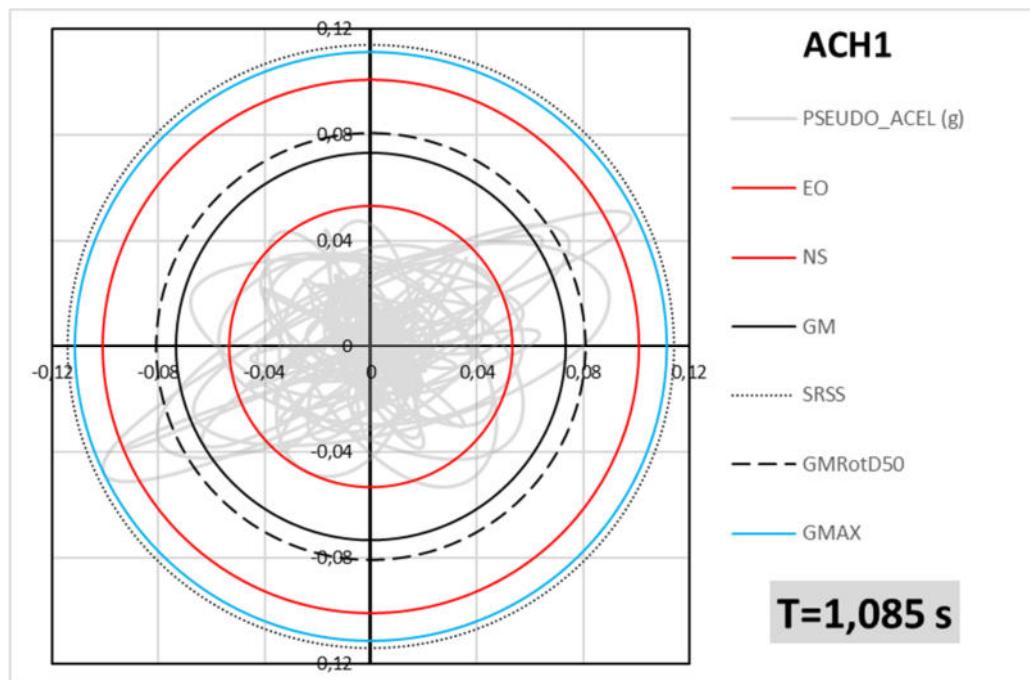


Figura 45. Combinaciones espectrales para $T=1,085$ seg de la estación ACH1 del terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.

En el caso de la Figura 46, para el registro sísmico de la estación Valdivia (Chile-Maule 2010) se obtuvo la respuesta máxima de la estructura de un grado de libertad que resultó igual a 0.2793g para la dirección NS y 0.5278g para la dirección EO. Por ello, el valor de GM y GMRotD50 resultó igual a 0.3839g y 0.3978g respectivamente. Sin embargo, aplicando la metodología para obtener el valor GMax este resultó igual a 0.5311g, mientras que el valor del SRSS resultó igual 0.5972g; se puede comprobar

entonces que para este tipo de casos en particular: en el cual las componentes difieren en magnitud, el valor del SRSS y GMax se asemejan entre si.

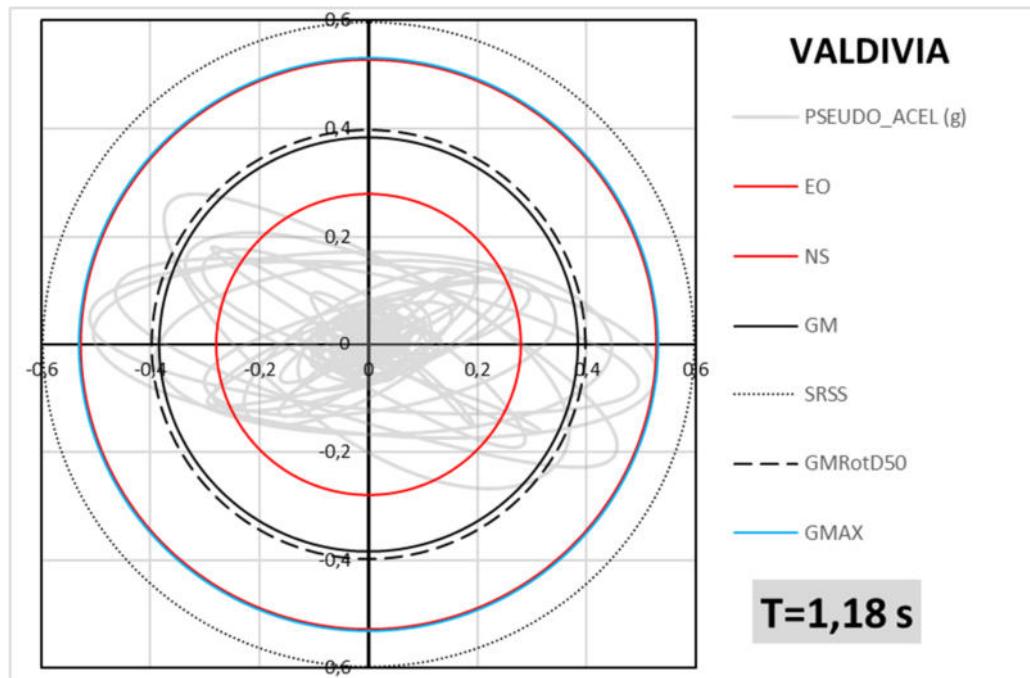


Figura 46. Combinaciones espectrales para $T=1,18$ seg de la estación Valdivia del terremoto de Chile-Maule 2010.

Al analizar la Figura 45 y Figura 46 “se puede observar que la respuesta tiene una forma elíptica, y aún cuando los máximos de cada dirección no son iguales, estos se dan simultáneamente para el mismo tiempo”(Lascano, 2018, p.47).

4.7.GMax/GM vs T

En la Figura 47 y Figura 48 se muestra una línea gris continua que representa las relaciones GMax/GM vs T para los registros sísmicos de Ecuador-Pedernales 2016 y Chile-Maule 2010 respectivamente. A partir de estos datos se obtuvo un promedio y se realizó una propuesta para posteriormente compararla con la ecuación de (American Society of Civil Engineers, 2017, p.205).

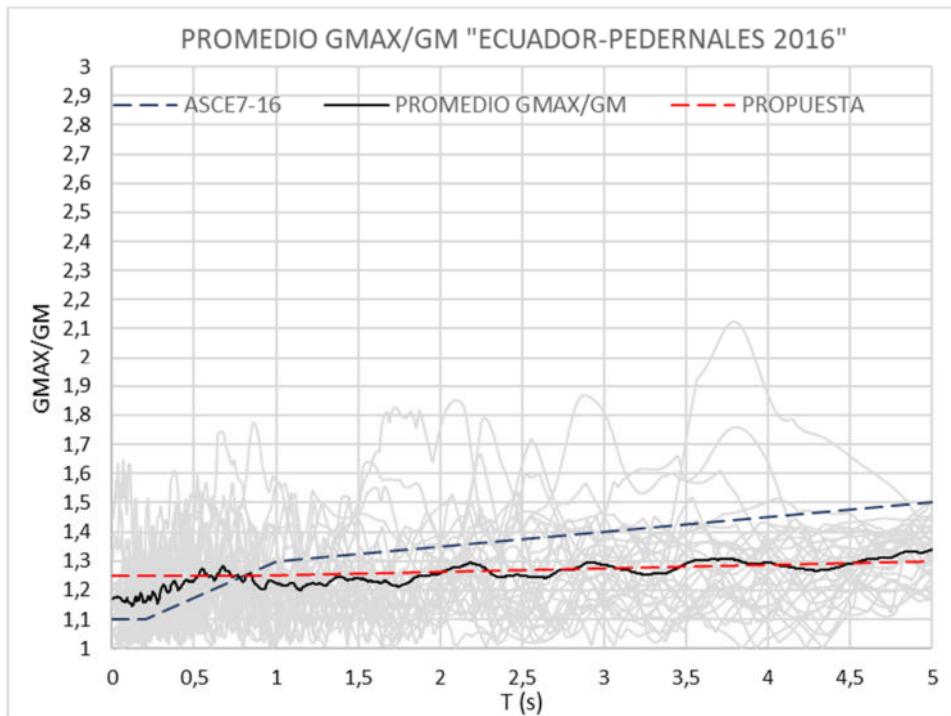


Figura 47.Relación GMax/GM vs T para todos los registros sísmicos del terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.

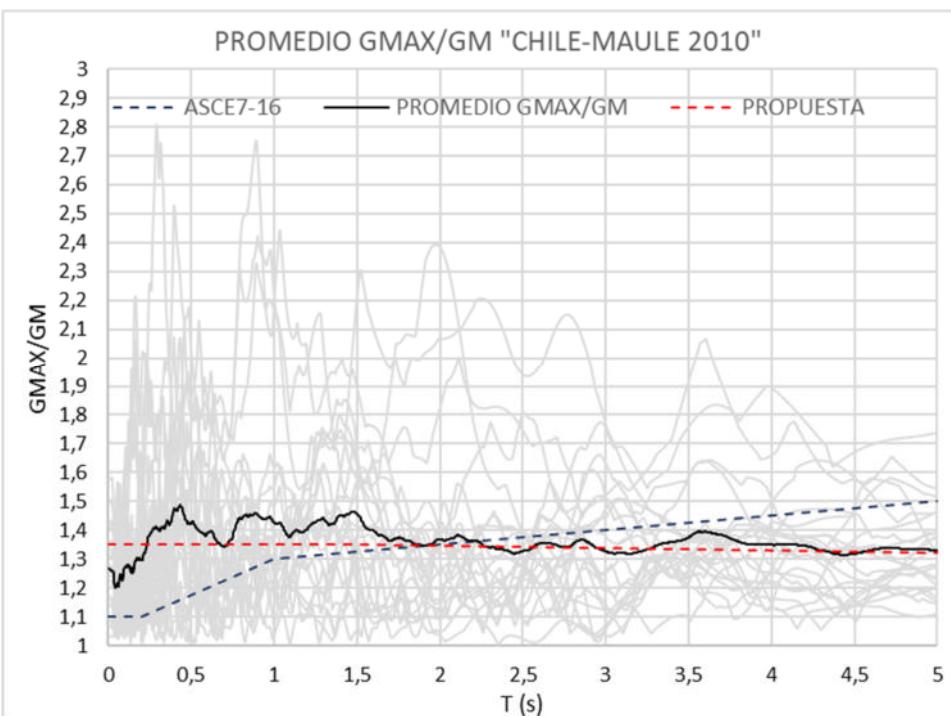


Figura 48.Relación GMax/GM vs T para todos los registros sísmicos del terremoto de Chile-Maule 2010.

4.8.Ecuador-Pedernales 2016: GMax/GM vs T

En base a la clasificación de la Sección 3.2 se dividieron los registros sísmicos del terremoto de Ecuador-Pedernales 2016 en 3 grupos, con el objetivo de evidenciar una posible diferencia con respecto a hacerlo como un promedio global.

Al analizar la Figura 49, Figura 50 y Figura 51 se puede observar claramente que no existe una gran diferencia con respecto a la Figura 47 , es por ende que las propuestas generadas en estas gráficas tienen una gran similitud entre ellas, específicamente se exhibe que en Figura 49, Figura 50 el factor de escala de GM a GMax será 1.3 mientras que para la Figura 51 será 1.2.

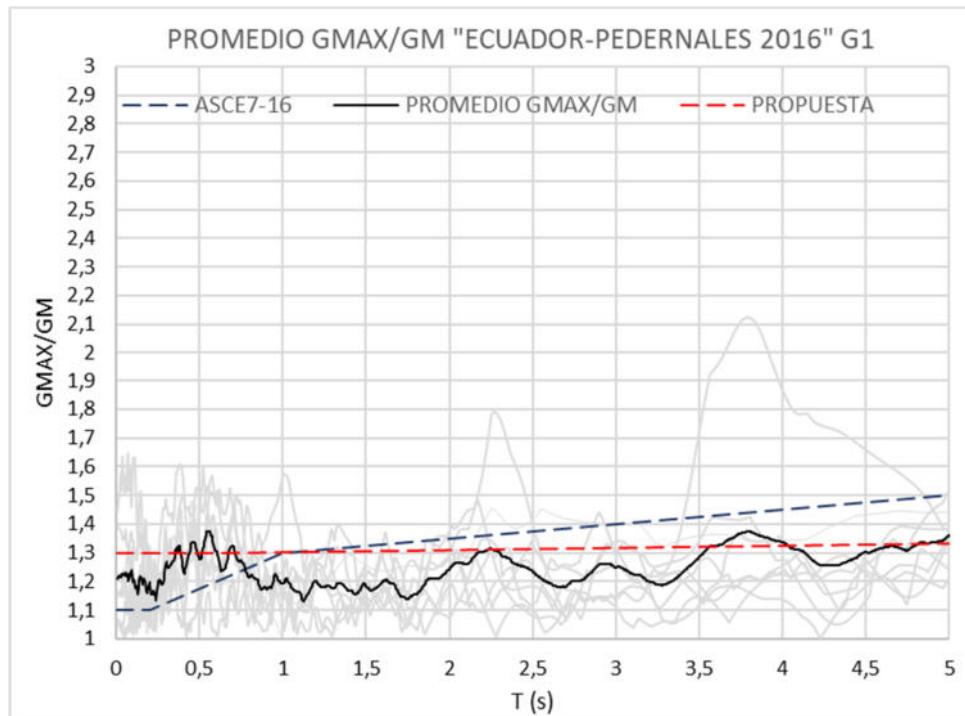


Figura 49.Relación GMax/GM vs T para los registros sísmicos situados en la clasificación del Grupo I y pertenecientes al terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.

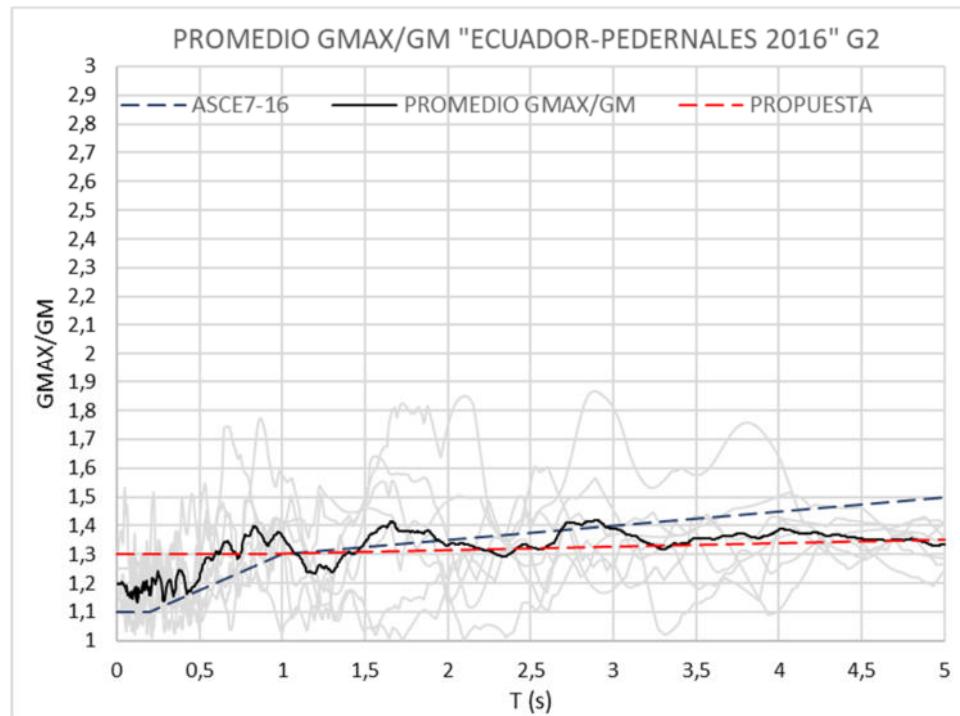


Figura 50. Relación $G_{\text{Max}}/G_{\text{M}}$ vs T para los registros sísmicos situados en la clasificación del Grupo 2 y pertenecientes al terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.

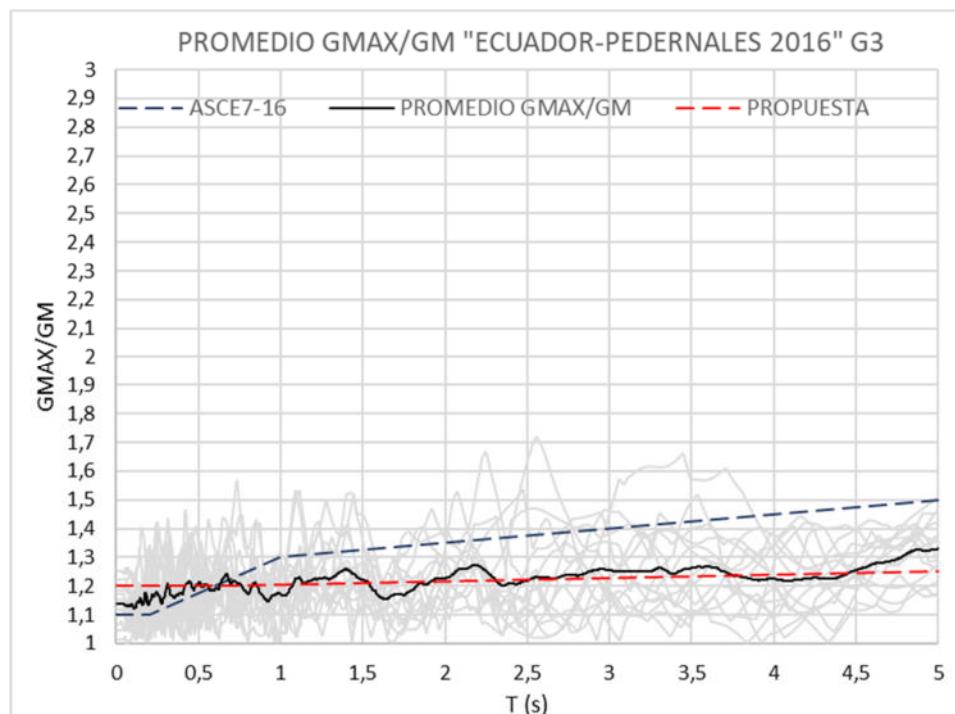


Figura 51. Relación $G_{\text{Max}}/G_{\text{M}}$ vs T para los registros sísmicos situados en la clasificación del Grupo 3 y pertenecientes al terremoto de Ecuador-Pedernales 2016.

4.9.Chile-Maule 2010: GMax/GM vs T

Al igual que en la sección anterior, basándose en la clasificación de la Sección 3.2 se dividieron los registros sísmicos del terremoto de Chile-Maule 2010 en 3 grupos, con el objetivo de evidenciar una posible diferencia con respecto a hacerlo como un promedio global.

Al examinar la Figura 52, Figura 53 y Figura 54 se puede volver a evidenciar que no existe una gran diferencia con respecto a la Figura 48 , es por ende que las propuestas generadas en estas gráficas son muy similares entre ellas, específicamente se observa que en la Figura 52 el factor de escala de GM a GMax será 1.3,mientras que para la Figura 53 y Figura 54 será 1.4.

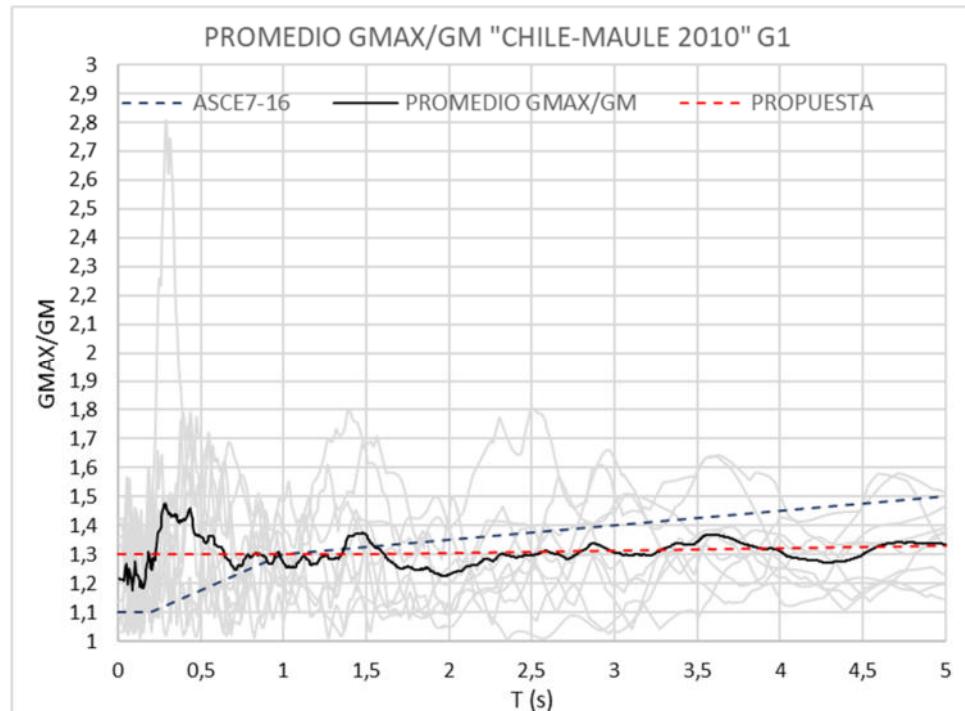


Figura 52. Relación GMax/GM vs T para los registros sísmicos situados en la clasificación del Grupo I y pertenecientes al terremoto de Chile-Maule 2010.

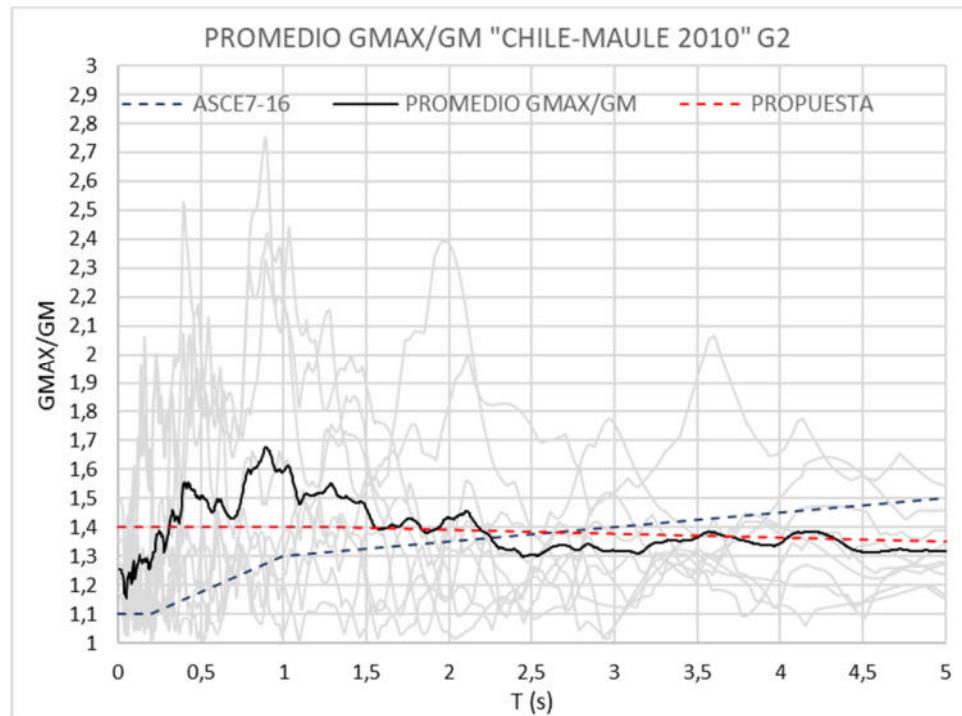


Figura 53. Relación GMax/GM vs T para los registros sísmicos situados en la clasificación del Grupo 2 y pertenecientes al terremoto de Chile-Maule 2010.

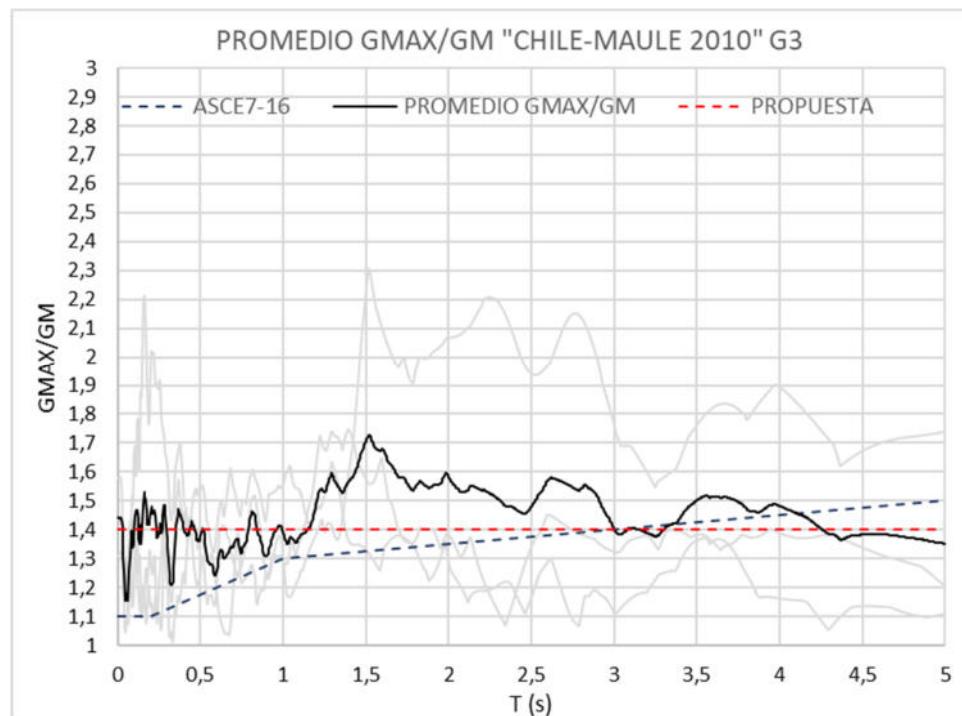


Figura 54. Relación GMax/GM vs T para los registros sísmicos situados en la clasificación del Grupo 3 y pertenecientes al terremoto de Chile-Maule 2010.

4.10.Global: GMax/GM vs T

En las secciones 4.7, 4.8 y 4.9 se observó que no existe una gran diferencia con respecto a clasificar los registros sísmicos en 3 grupos distintos, es por ende que finalmente se optó por realizar un promedio general de todos los registros sísmicos analizados en este trabajo de grado (Ecuador-Pedernales 2016 y Chile-Maule 2010).

Finalmente se propone que el factor de escala para convertir GM a GMax debe ser 1.3 para cualquier período en análisis.

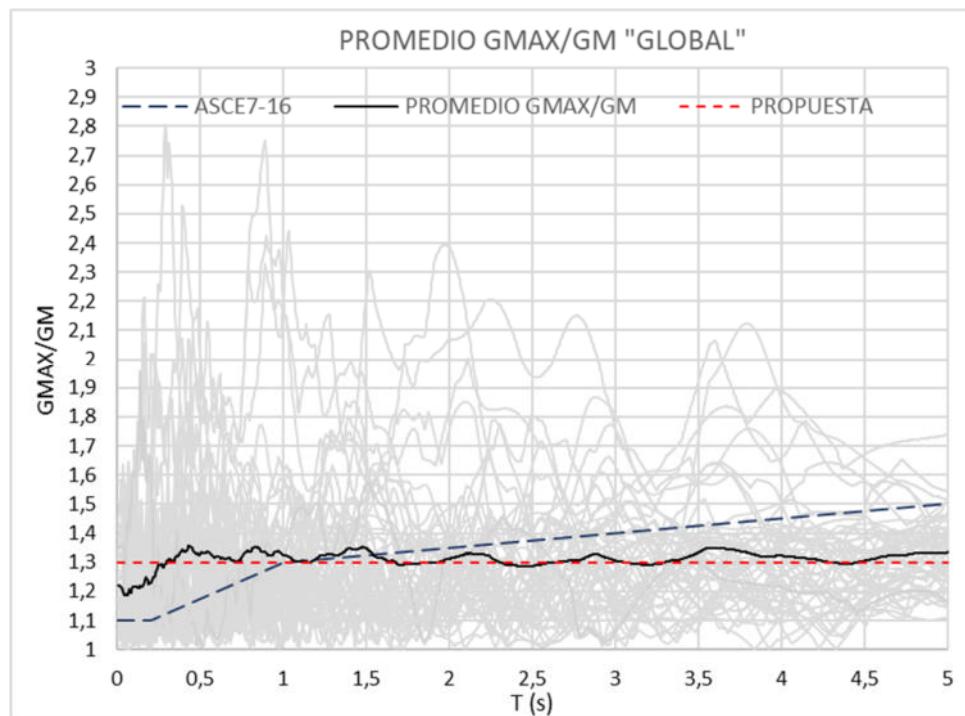


Figura 55. Relación GMax/GM vs T para todos los registros sísmicos analizados en este trabajo de grado (Ecuador-Pedernales 2016 y Chile Maule 2010).

CAPÍTULO 5

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

- El método de combinación de componentes horizontales GM es un método más racional dado que se calcula de manera similar a la de un promedio; es por ende que una de las principales diferencias con respecto al método SRSS es que no sobredimensiona la respuesta espectral.
- El método GMax en comparación con el método SRSS otorga resultados más realistas debido a que calcula las respuestas en cada instante de tiempo y luego obtiene la máxima respuesta espectral en base a los datos calculados anteriormente, en contraste, el método SRSS calcula la respuesta espectral máxima en diferentes tiempos en que estas ocurren.
- Cuando las componentes son similares entre ellas, se evidencia una gran diferencia entre los métodos GM, GMRotDpp, GMax con respecto al SRSS.
- Cuando las componentes son diferentes entre ellas, se evidencia una gran similitud entre los métodos GMax y SRSS.
- Se concluye que la forma en circunferencia ocurre en los casos en el cual las componentes son similares entre ellas, en contraste. la forma elíptica sucede cuando las componentes presentan grandes diferencias entre ellas.
- Se descubrió que clasificar los registros sísmicos en función del período del suelo no influía en la relación GMax/GM vs T.
- En base a los resultados obtenidos de todos los registros sísmicos analizados en este trabajo de grado, se concluyó que el factor de escala para convertir GM a GMax debe ser 1.3 para cualquier período.

5.2. Recomendaciones

- Corregir de ser necesario los registros sísmicos para obtener resultados racionales.
- Determinar la frecuencia dominante de los registros sísmicos y su influencia en los resultados.

- Encontrar que ventajas se lograrían si se rotaran los métodos de combinación de componentes horizontales GMax y SRSS en un rango de 0 a 90°.
- Estudiar si la ecuación de la (American Society of Civil Engineers, 2017, p.205) es compatible para registros de otras partes del mundo.
- Estudiar la influencia del amortiguamiento crítico en las comparaciones de los métodos de combinación de componentes horizontales.
- Estudiar la influencia de estructuras en el rango inelástico en los métodos de combinación de componentes horizontales.

6. REFERENCIAS

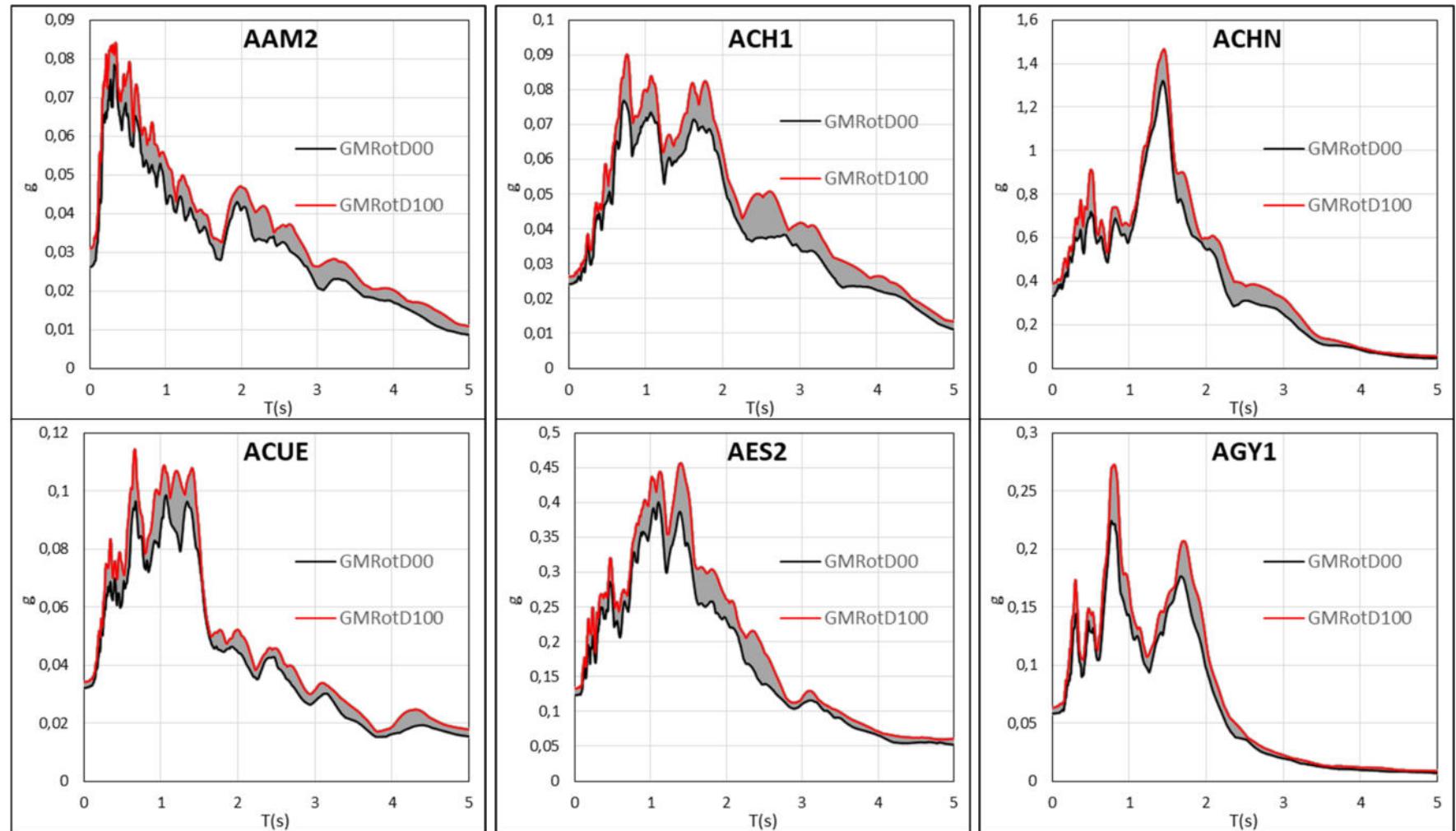
- Aguiar Falconí, R. (2010). Análisis de tres sismos interplaca tipo thrust registrados en: Chile 2010, Perú 2007 y Ecuador 1998. *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, 7(December 2010).
- American Society of Civil Engineers. (2017). Asce 7-16. In *Science* (Vol. 69). <https://doi.org/10.1126/science.69.1782.217-a>
- ASCE. (2010). ASCE STANDARD Loads for Buildings. In *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*.
- Ávila, L. (2018). *Espectros de Respuesta no lineales de combinación de Componentes horizontales de registros sísmicos usando el Método de Respuestas Máximas en el Tiempo (RMT)*. Retrieved from <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/11233>
- Boore, D. M., Watson-Lamprey, J., & Abrahamson, N. A. (2006). Orientation-independent measures of ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(4 A), 1502–1511. <https://doi.org/10.1785/0120050209>
- Chérrez, A. (2019). *Estimación de factores de amplificación de deflexión de estructuras de 1 grado de libertad para diferentes valores del factor de reducción por ductilidad ($R\mu$)*. 4(1), 75–84. Retrieved from <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/13835>
- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras* (Pearson). México: 2014.
- Huang, Y. N., Whittaker, A. S., & Luco, N. (2008). Maximum spectral demands in the near-fault region. *Earthquake Spectra*, 24(1), 319–341. <https://doi.org/10.1193/1.2830435>
- Lascano, G. (2018). *Combinación de componentes horizontales de registros sísmicos considerando la dirección y tiempo donde se producen las aceleraciones máximas . Comparación con el método de combinación espectral SRSS (ASCE 7)*. Retrieved from <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/10125>
- NEC-SE-DS. (2015). NEC-SE-DS Peligro Sísmico: Diseño Sismo Resistente. In *Peligro Sísmico: Diseño Sismo Resistente*. Retrieved from

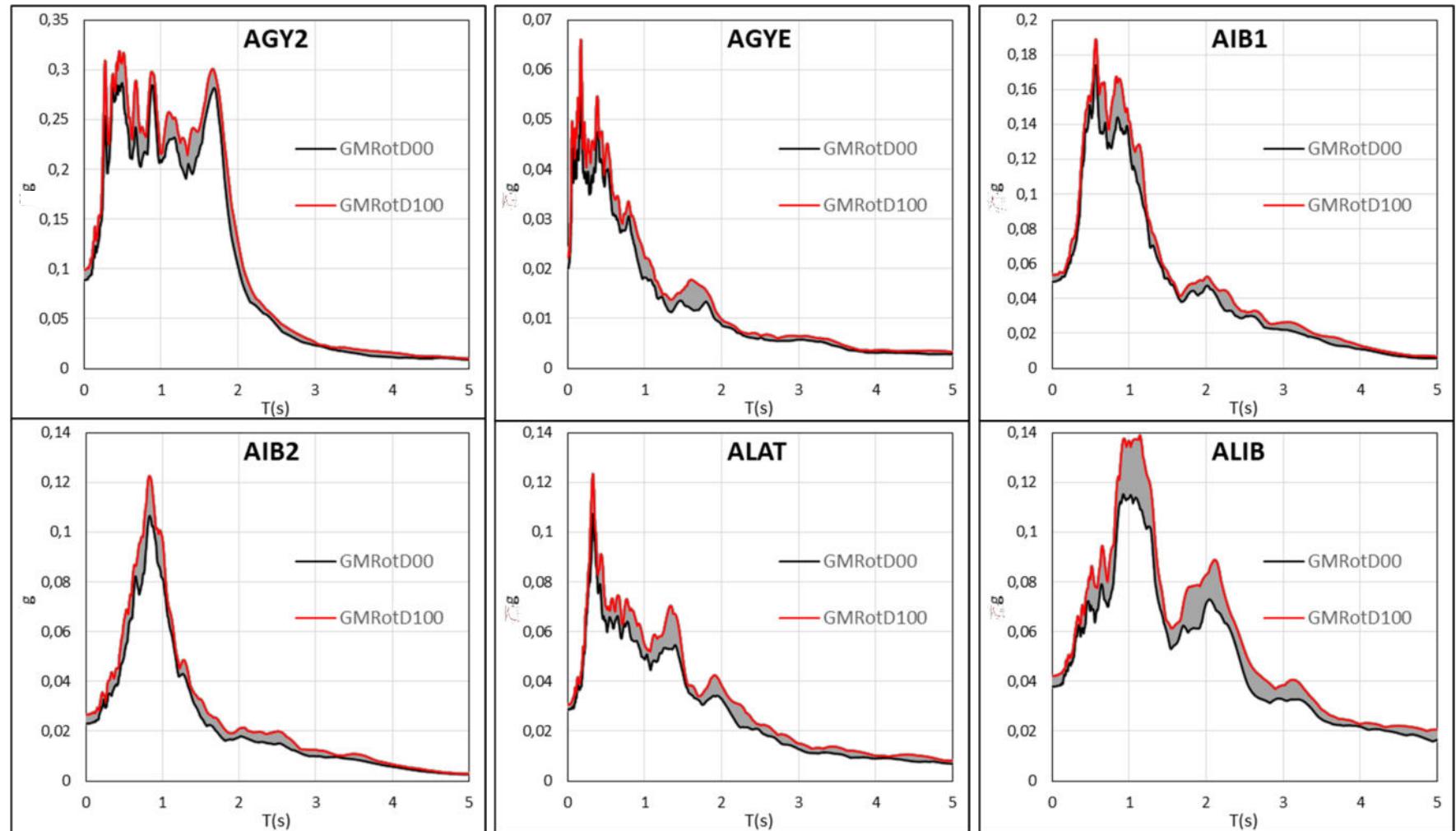
- <http://www.indeci.gob.pe/proyecto58530/objetos/archivos/20110606102841.pdf>
- Rosenblueth, E., & Contreras, H. (1977). Approximate Design for Multicomponent Earthquakes. *Journal of the Engineering Mechanics Division, 103*(5), 881–893. Retrieved from <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockey=0007668>
- Somerville, P. G., Smith, N. F., Graves, R. W., & Abrahamson, N. A. (1997). Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seismological Research Letters, 68*(1), 199–222. <https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.199>
- Spudich, B. P., Chiou, B. S. J., Graves, R., Collins, N., & Somerville, P. (2004). A Formulation of Directivity for Earthquake Sources Using Isochrone Theory. *U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. 2004-1268*, 54.
- Valdés González, J., & Ordaz Schroeder, M. (2008). ANÁLISIS DE EFECTOS SÍSMICOS ORTOGONALES HORIZONTALES EN TERRENO BLANDO. *Revista de Ingeniería Sísmica, Núm. 79, 2008, Pp. 91-111*. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?>
- Villao, Á. M. (2018). *Comparación del método de respuestas máximas en el tiempo (RMT) para combinación de componentes horizontales en registros sísmicos con el método SRSS (ASCE 7) para diferentes valores de amortiguamiento*. Retrieved from <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/11231>

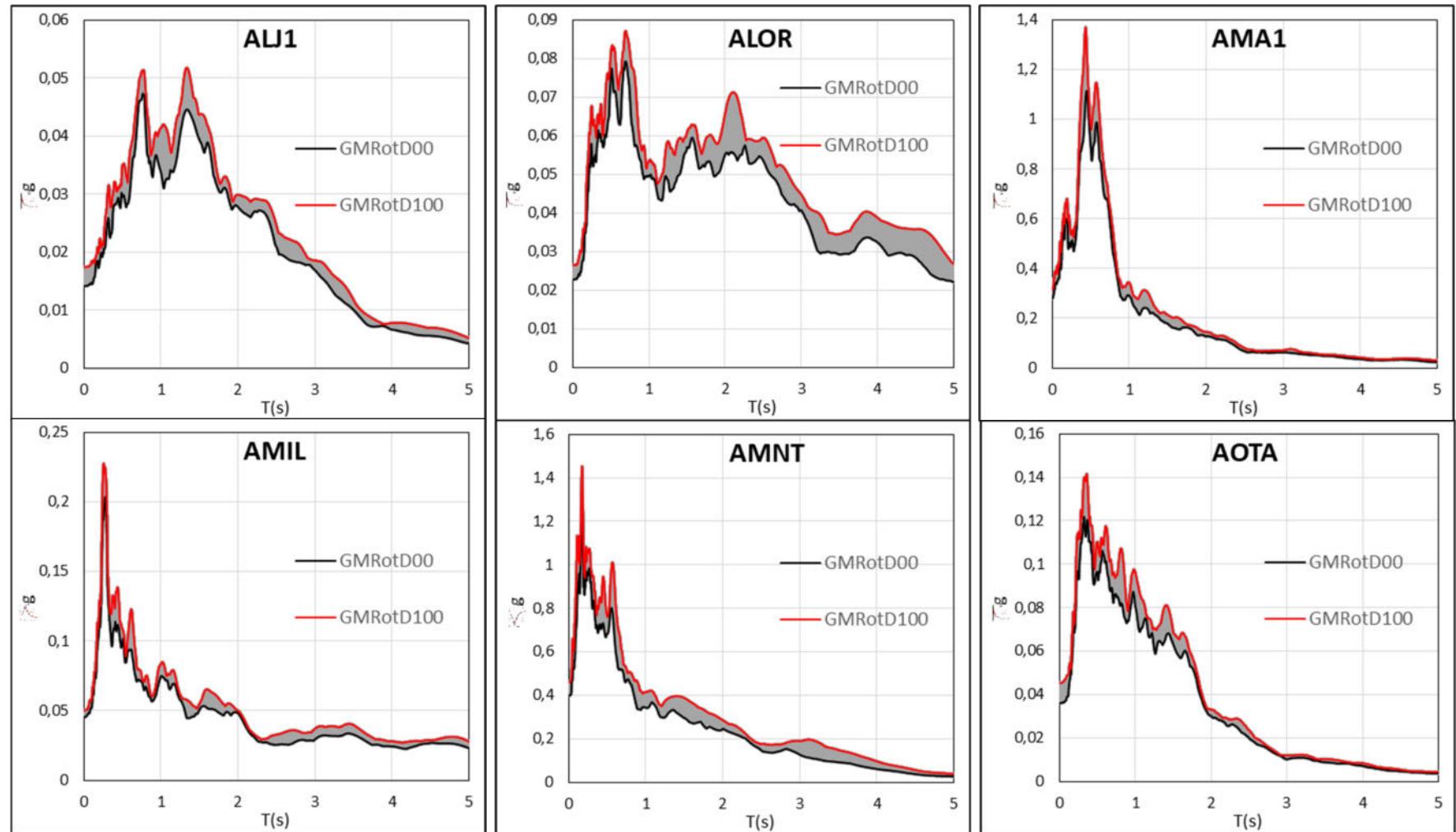
7. ANEXOS

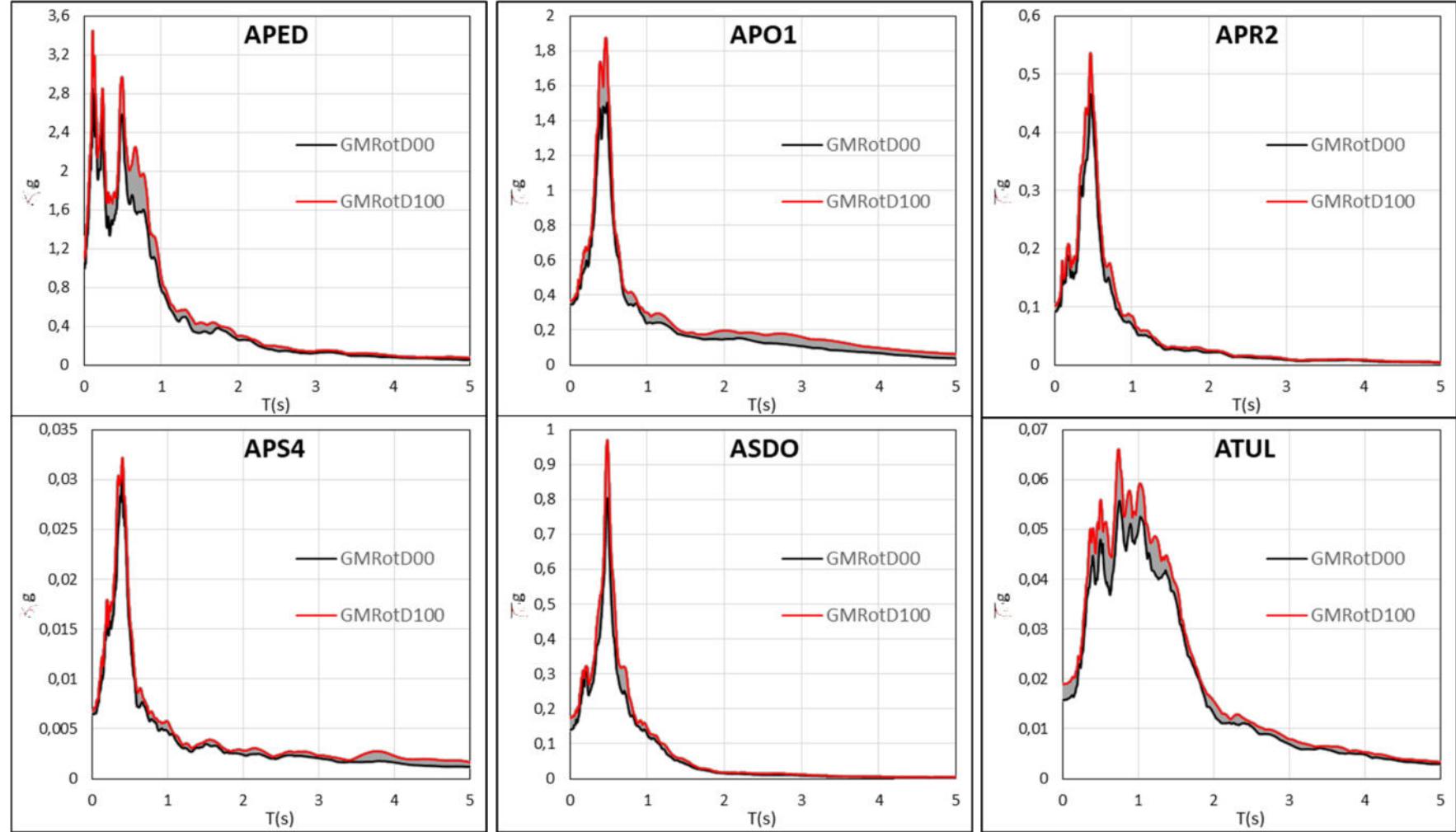
7.1. Ecuador-Pedernales 2016

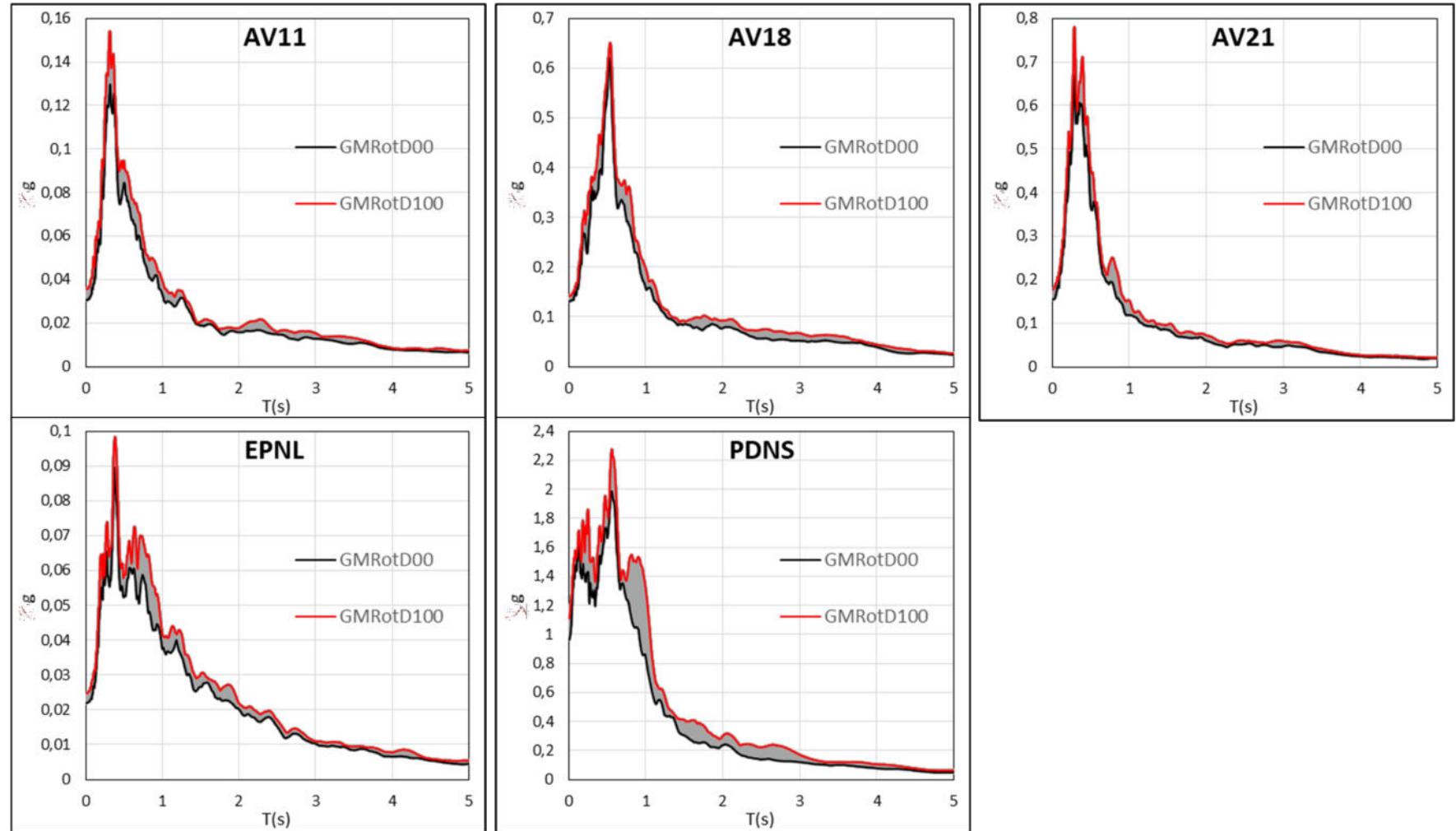
7.1.1. GM ($\theta_i = 0^\circ$: $\Delta\theta = 1^\circ$: $\theta_f = 90^\circ$)



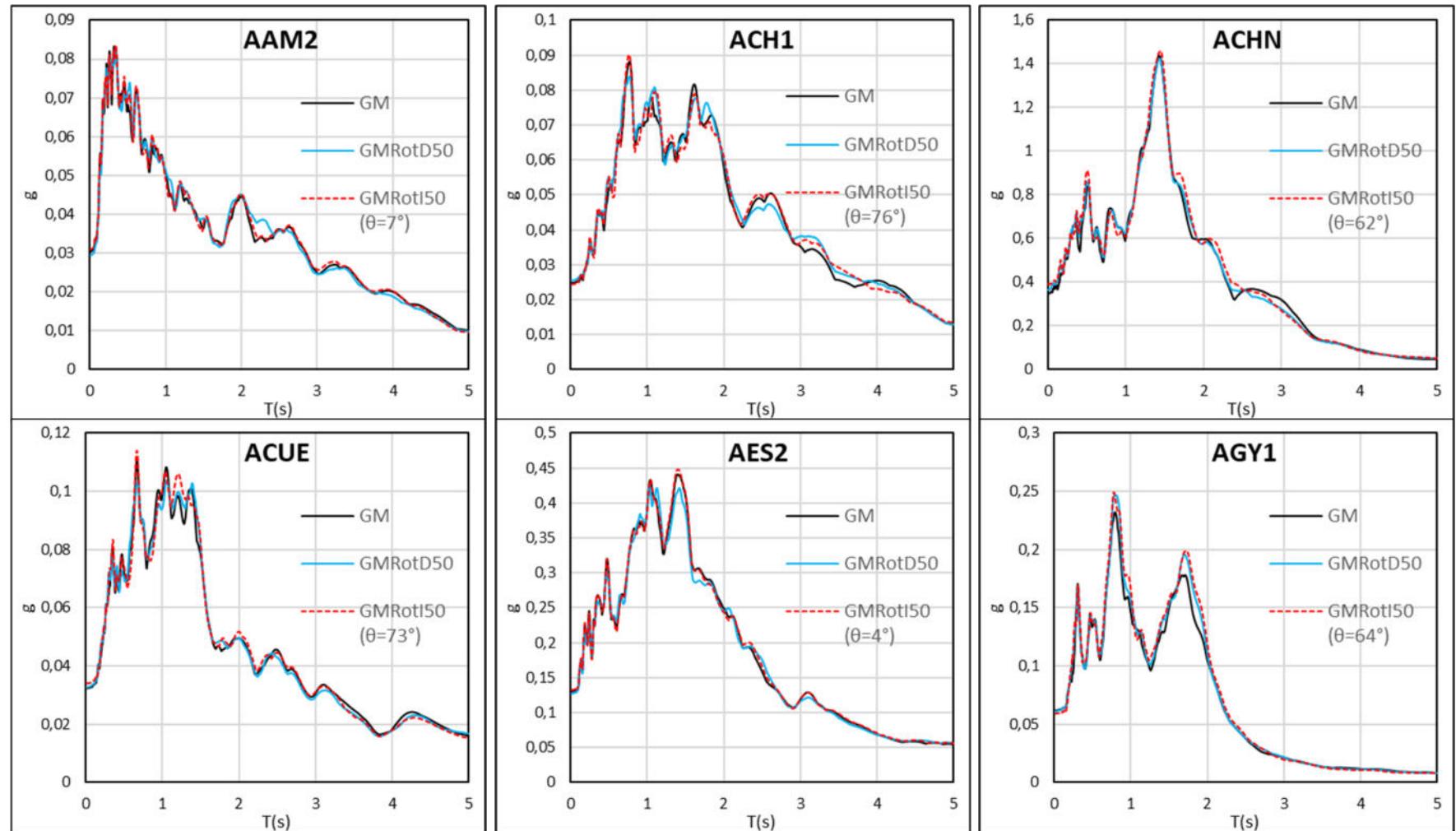


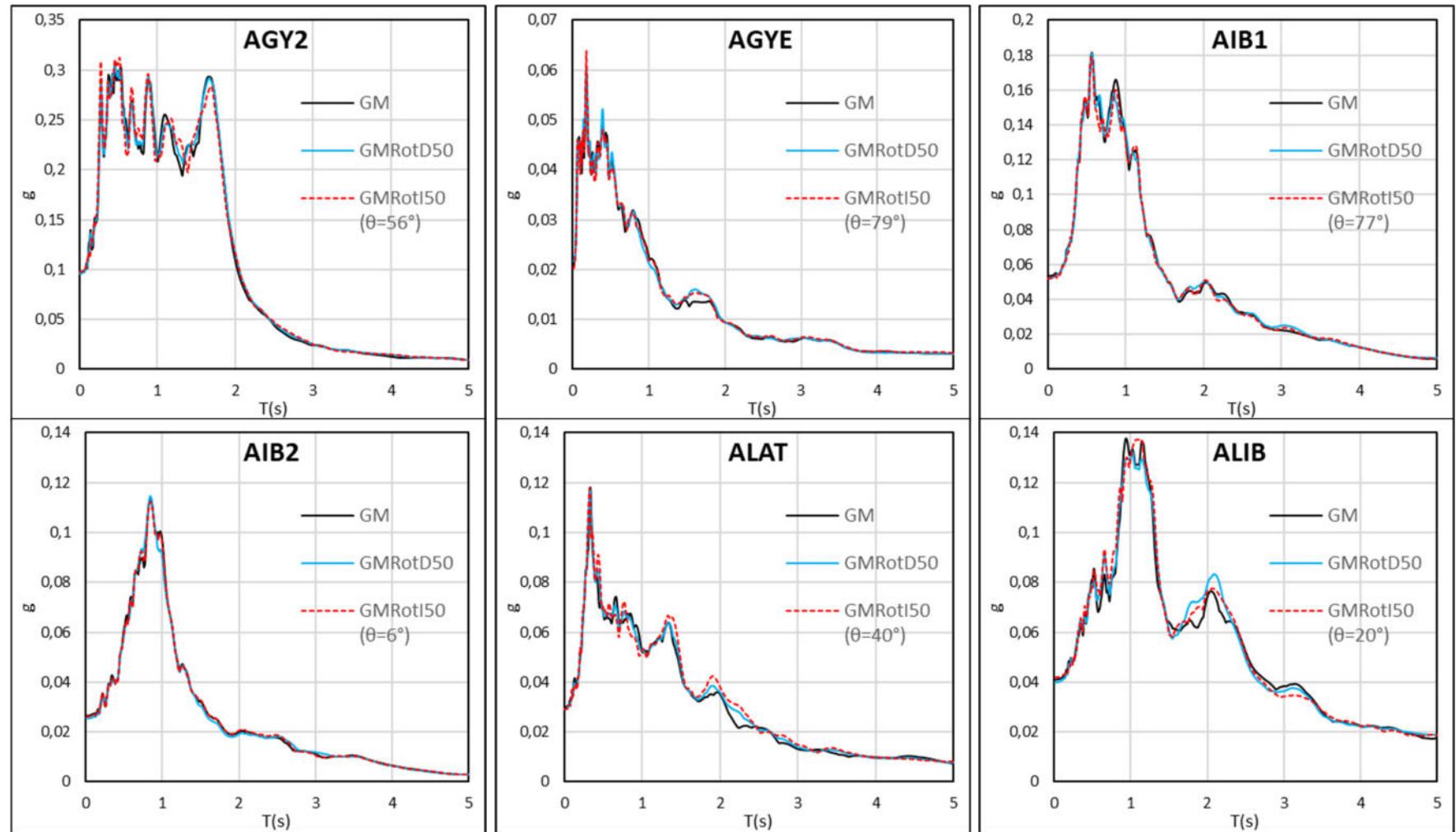


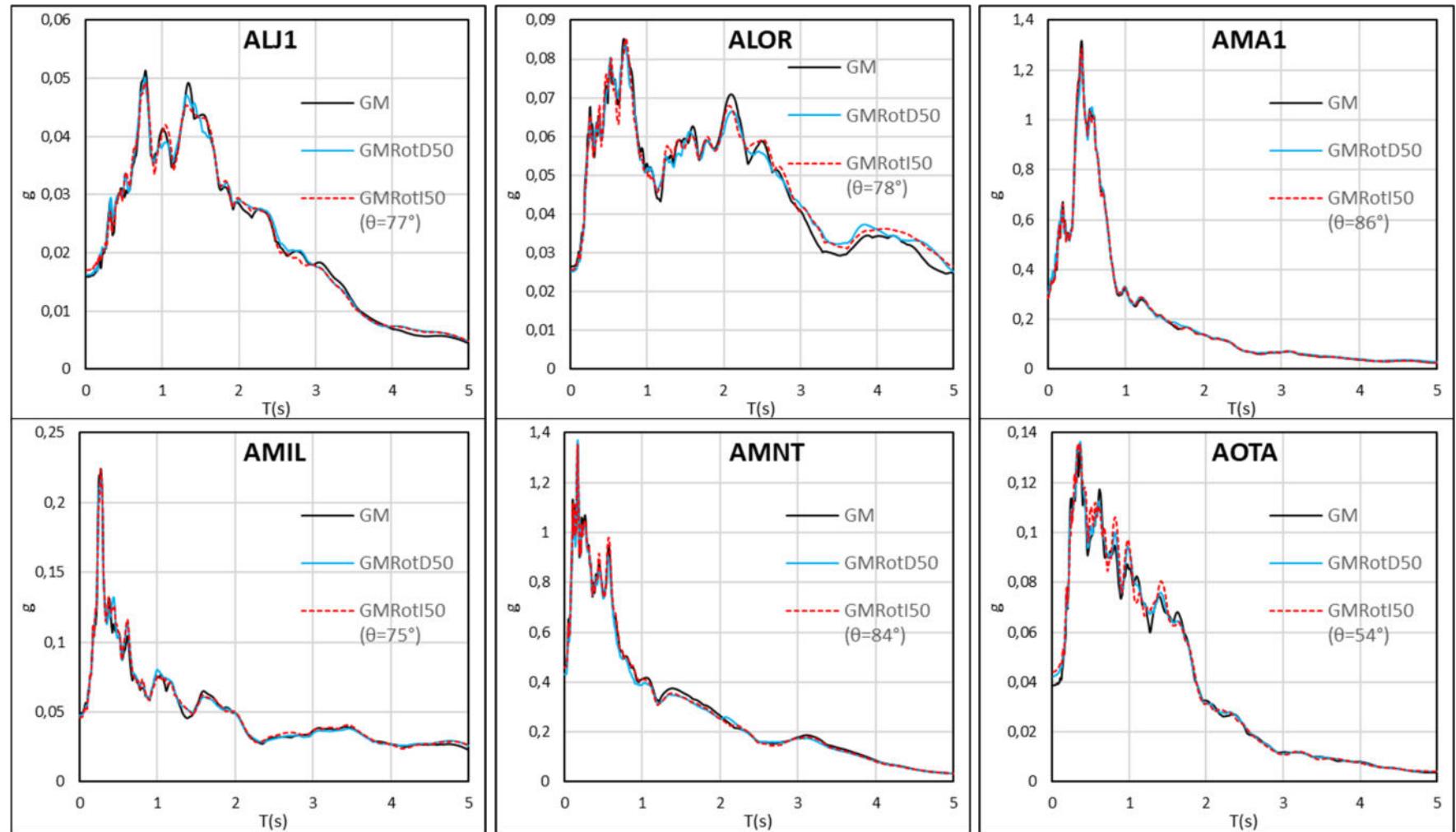


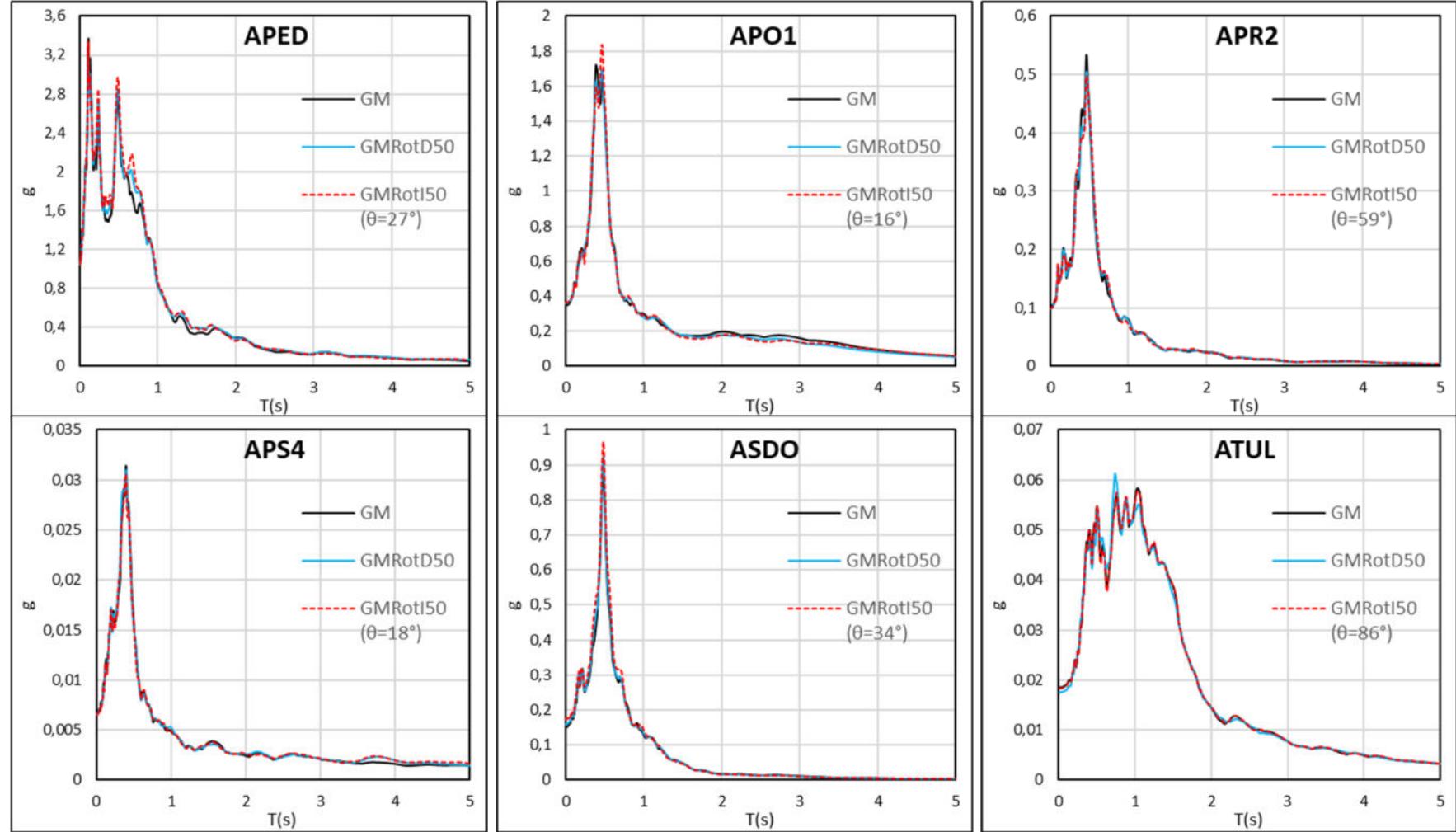


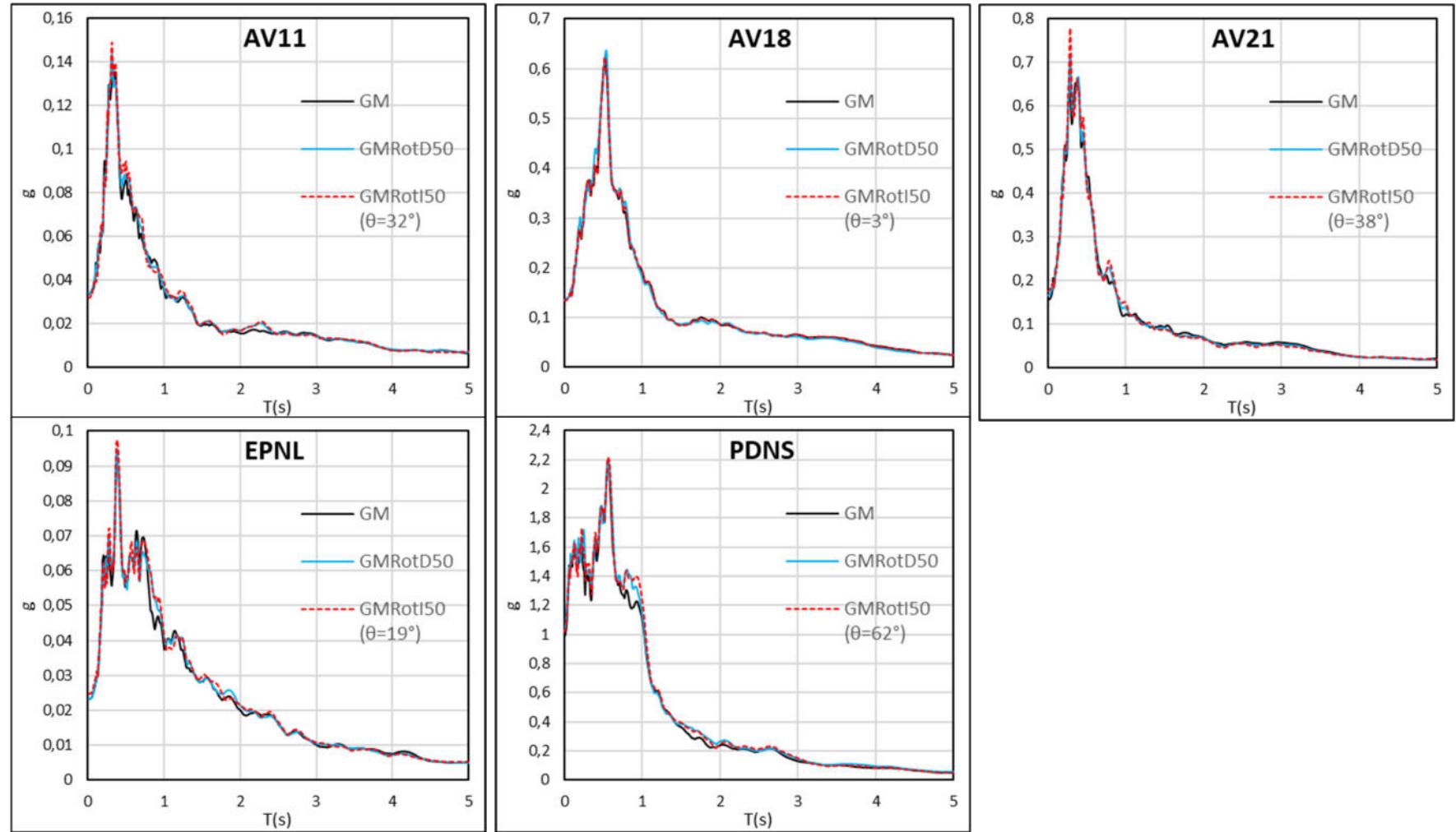
7.1.2. GM, GMRotD50 y GMRotI50



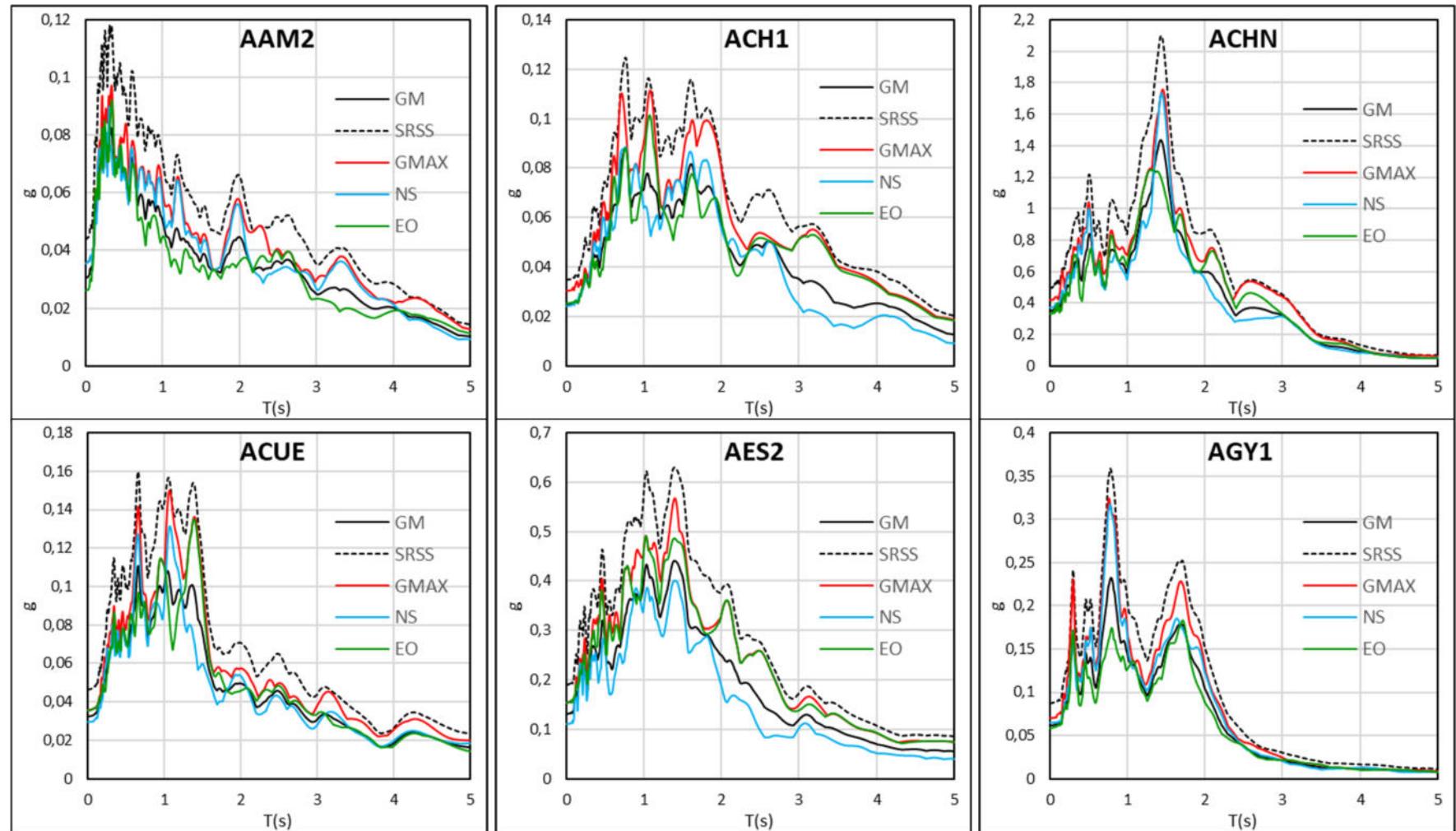


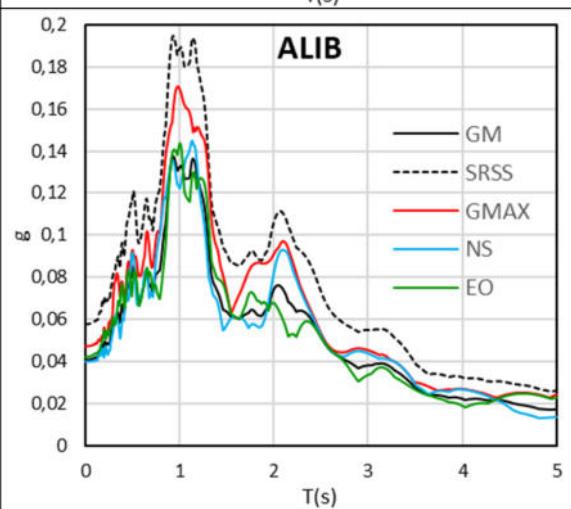
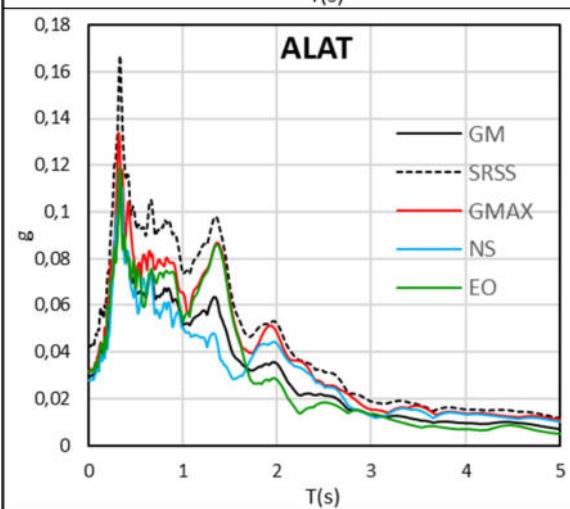
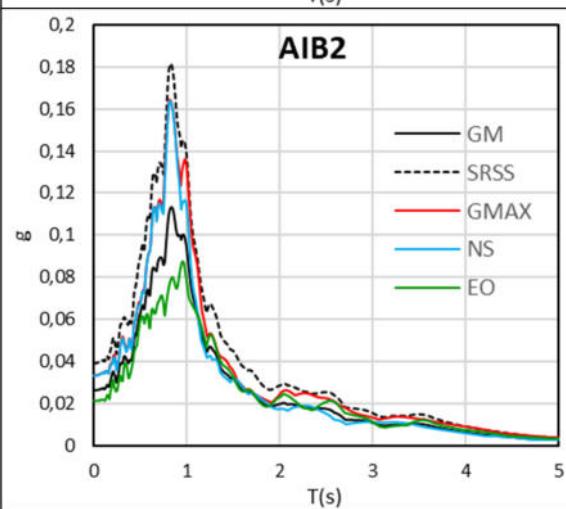
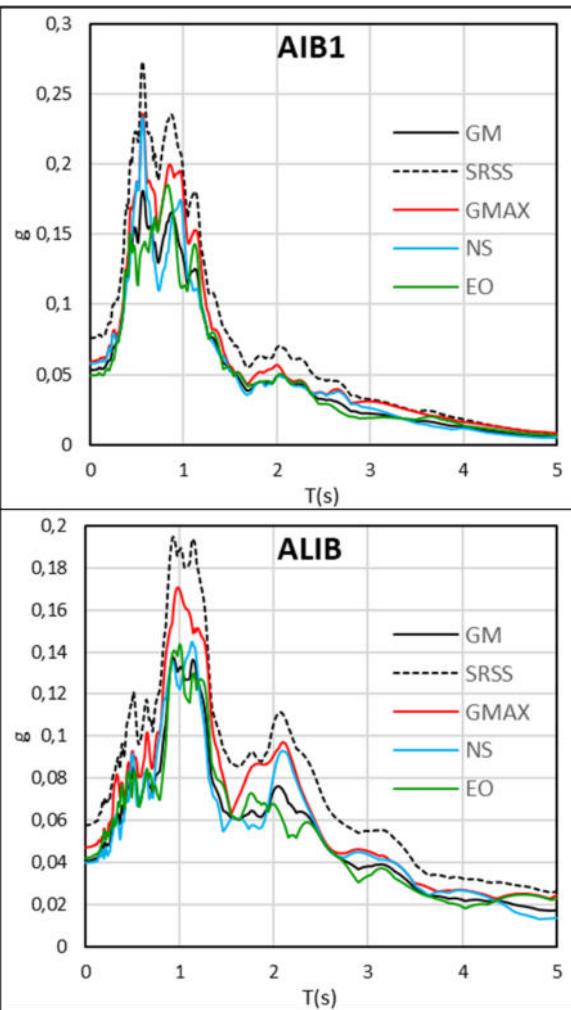
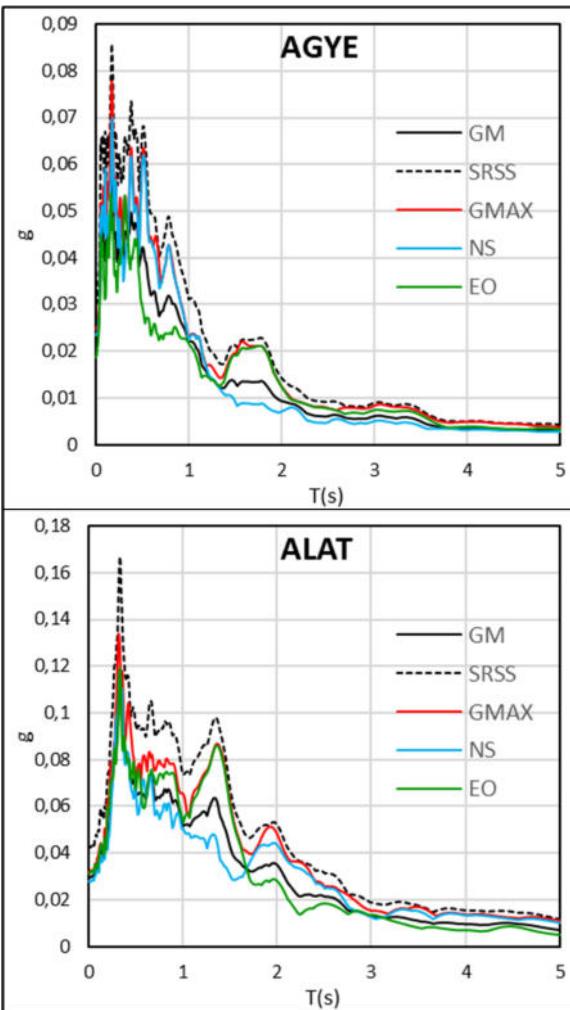
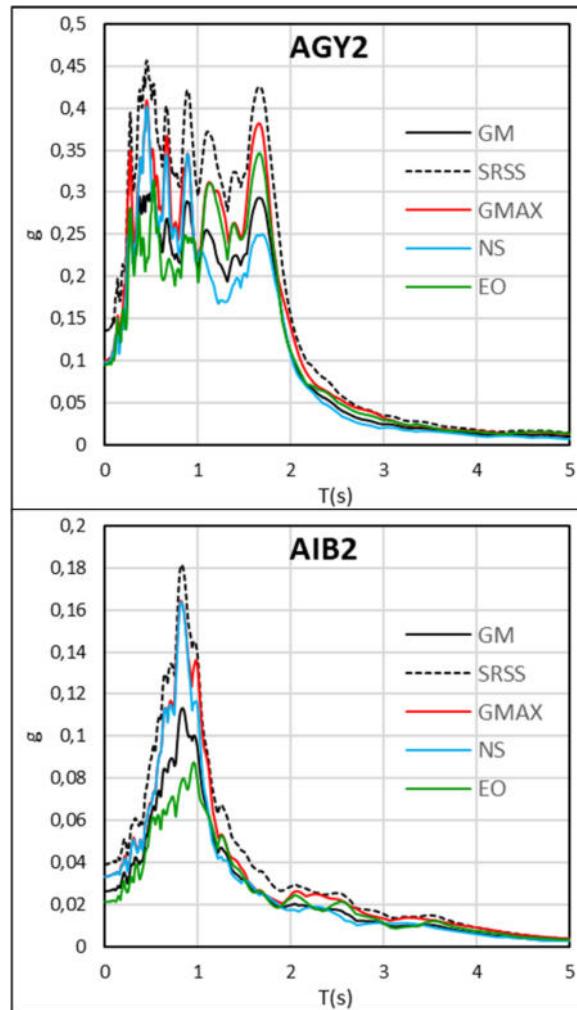


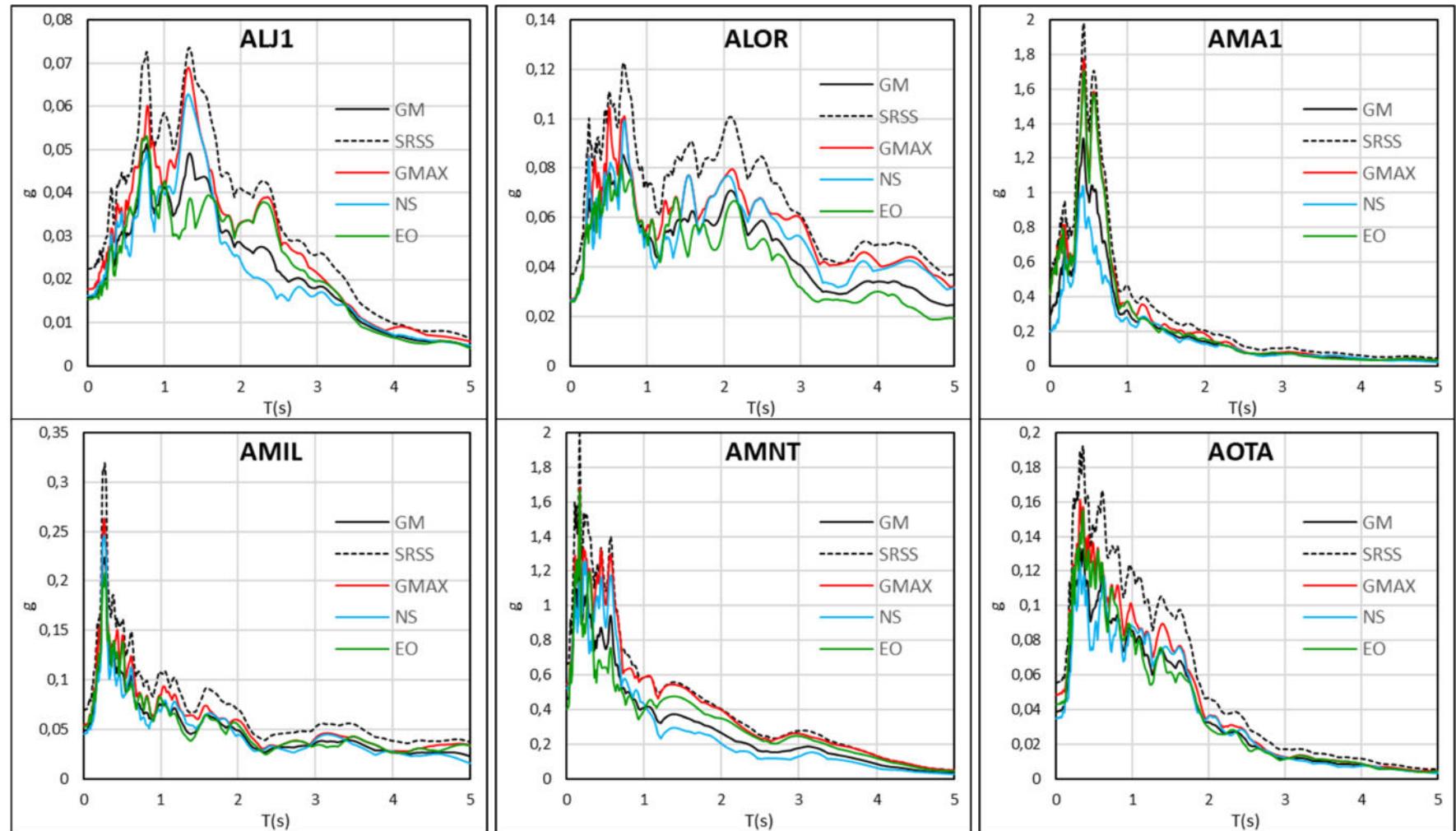


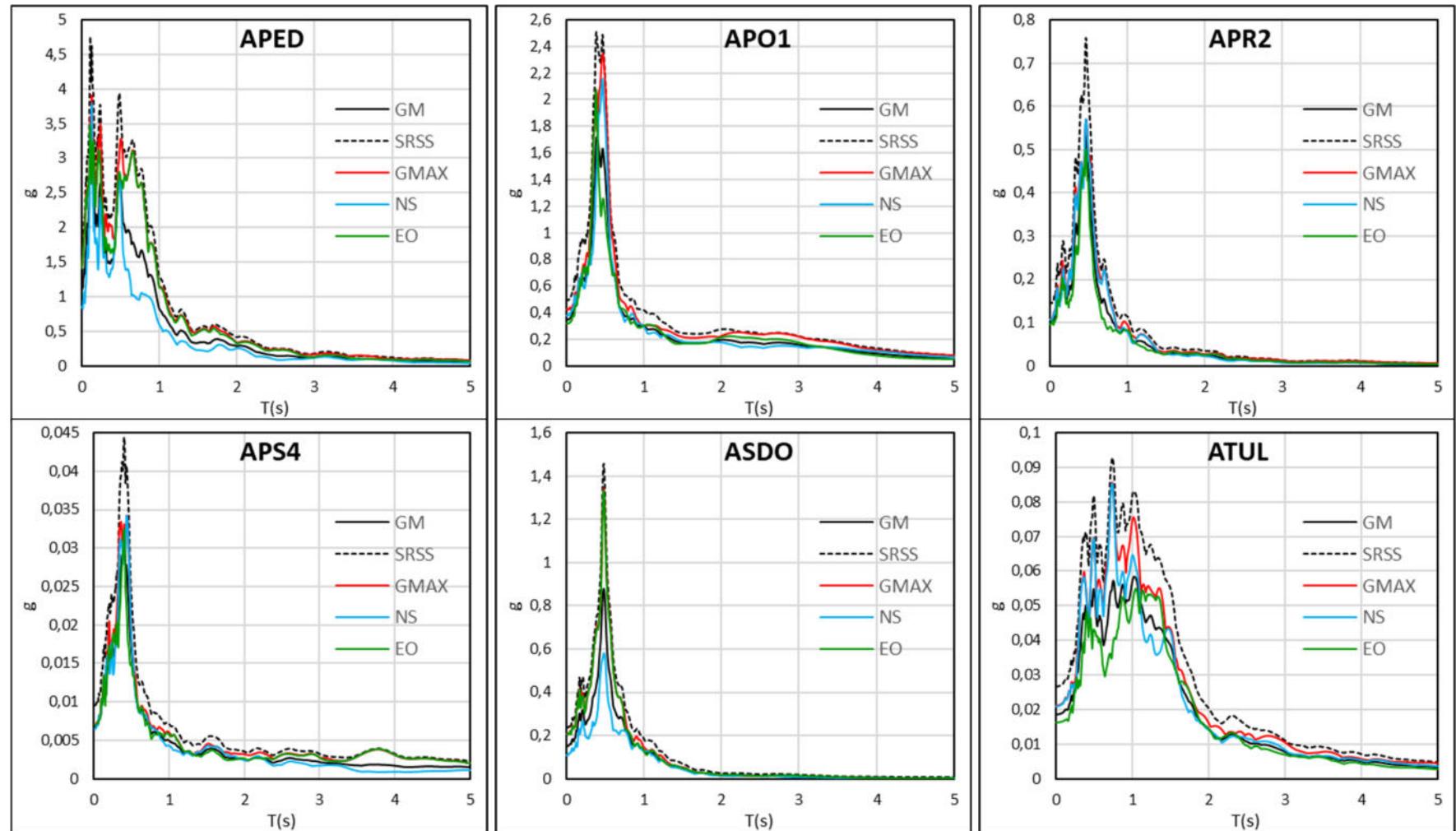


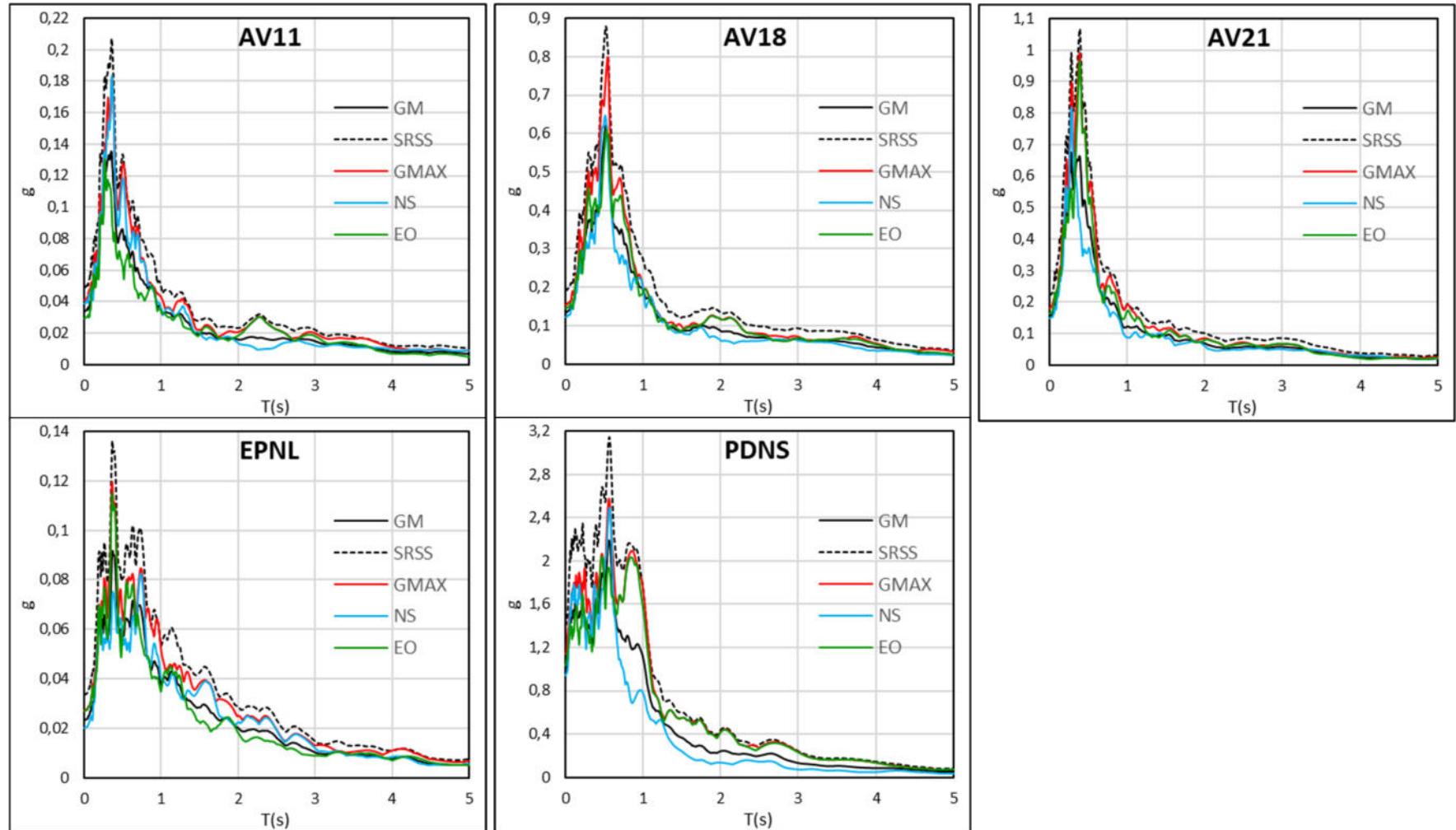
7.1.3. GM, SRSS, GMax, EO y NS



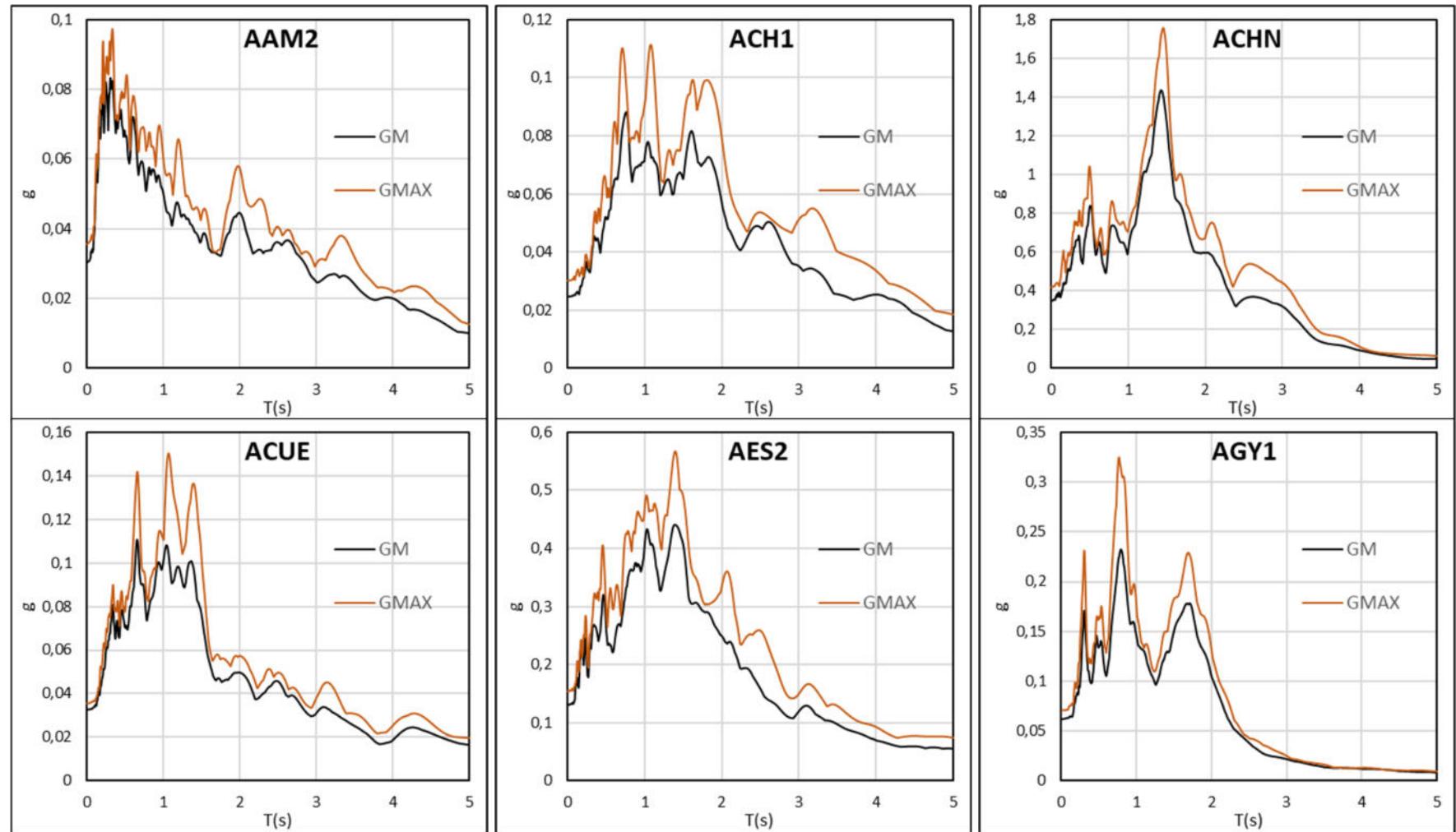


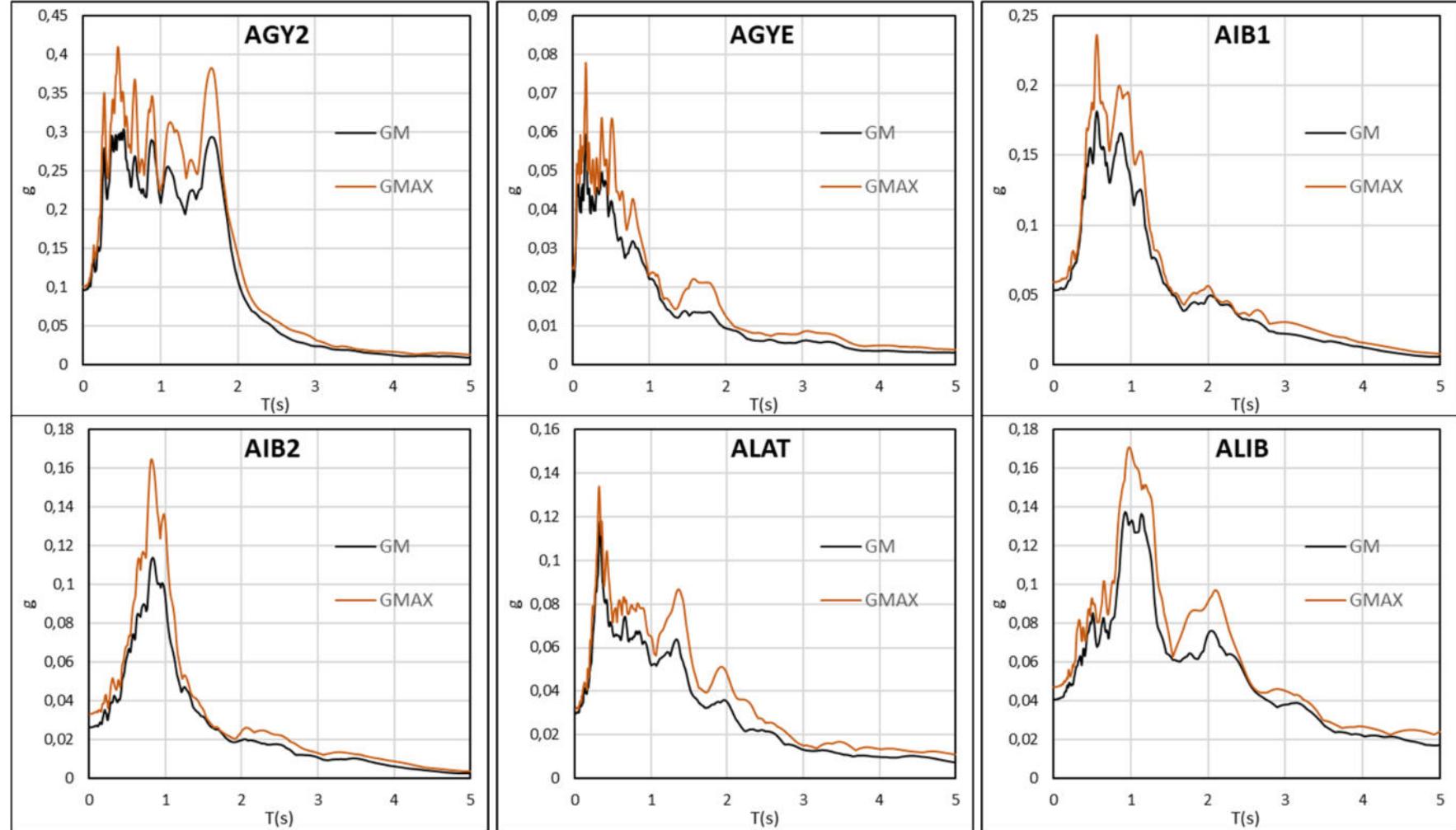


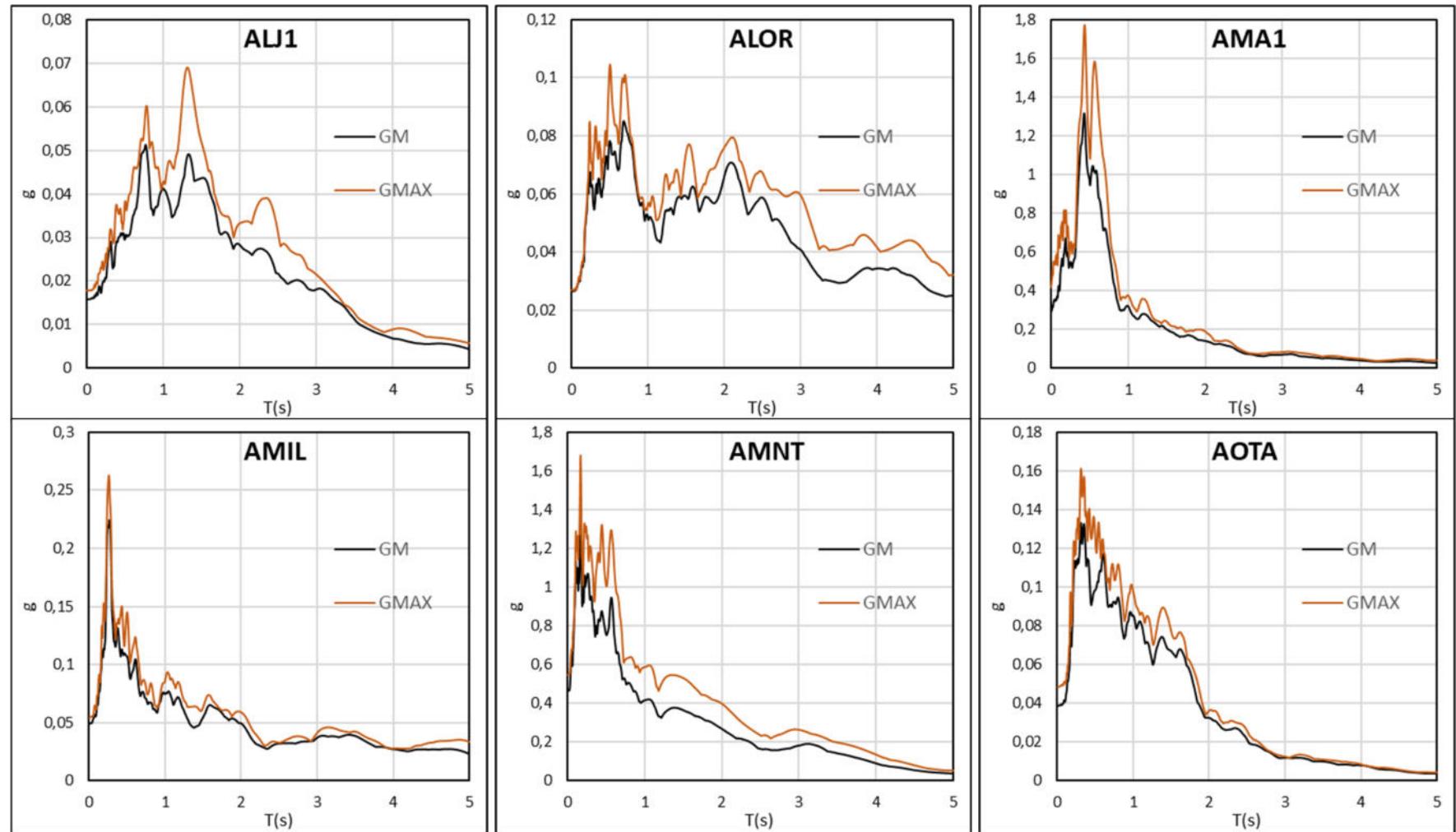


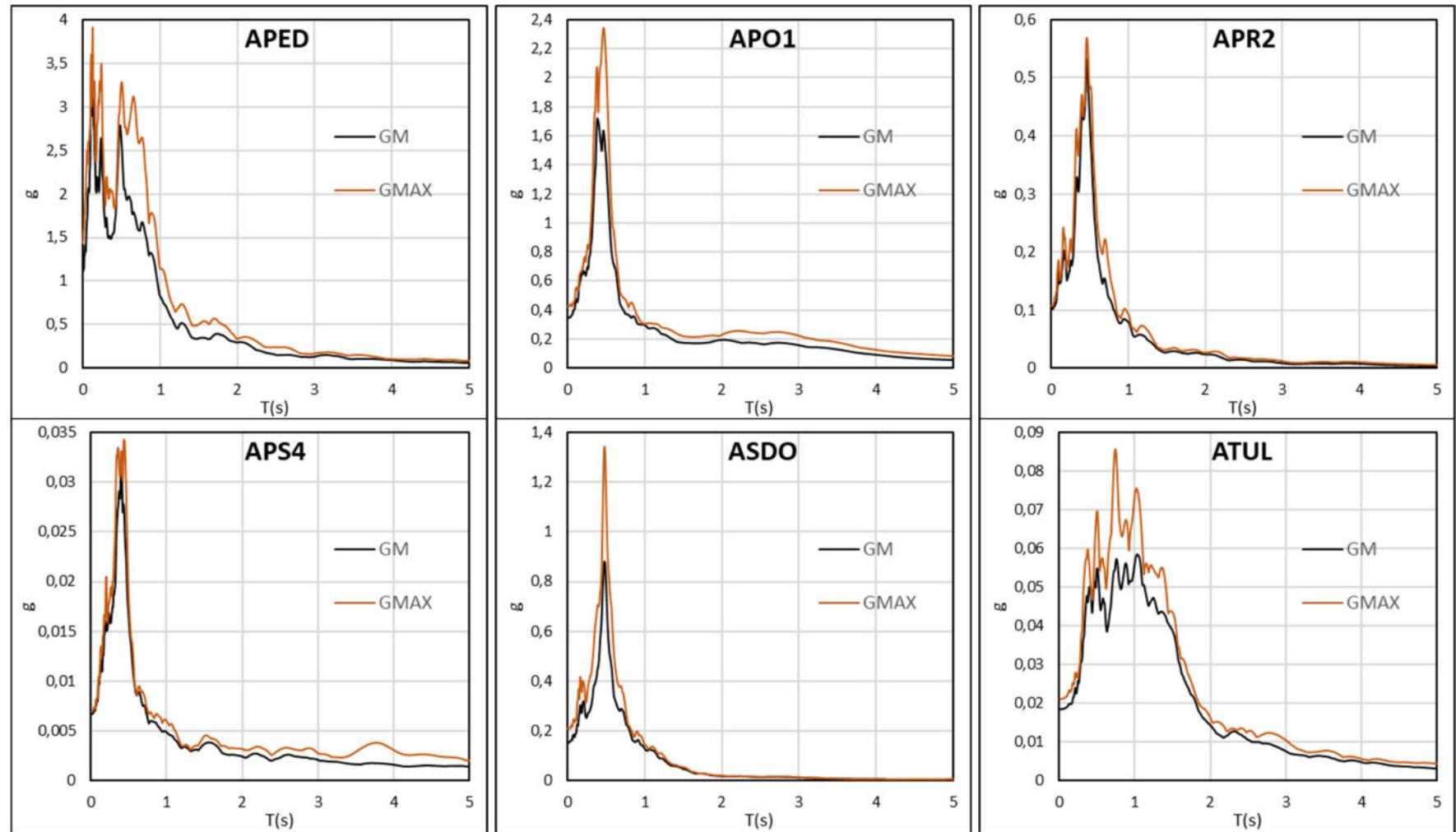


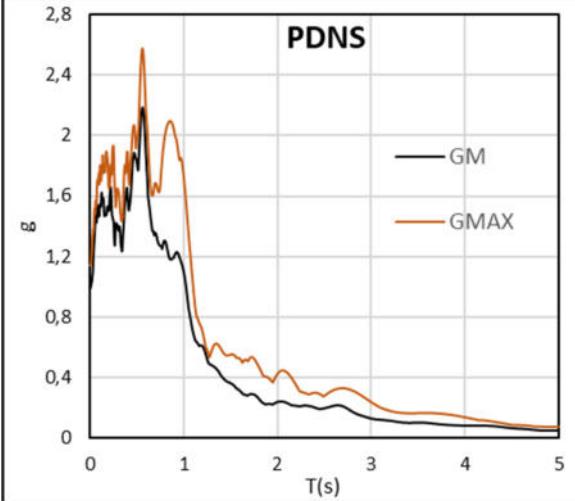
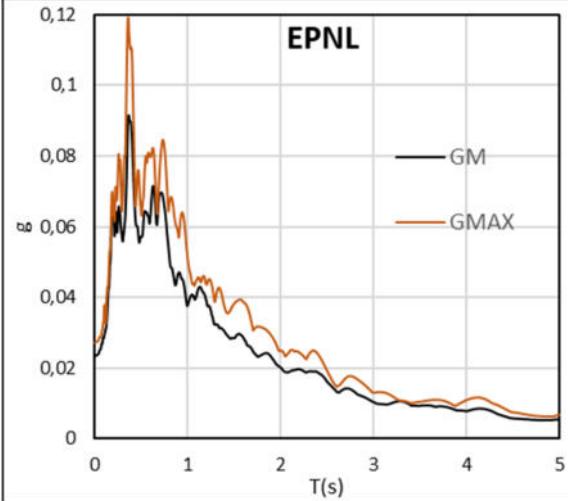
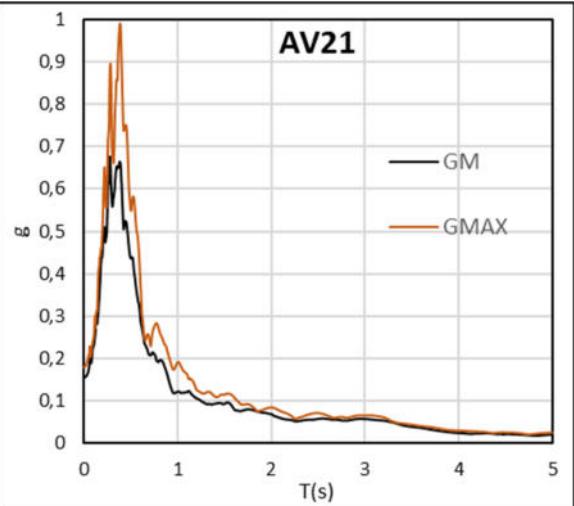
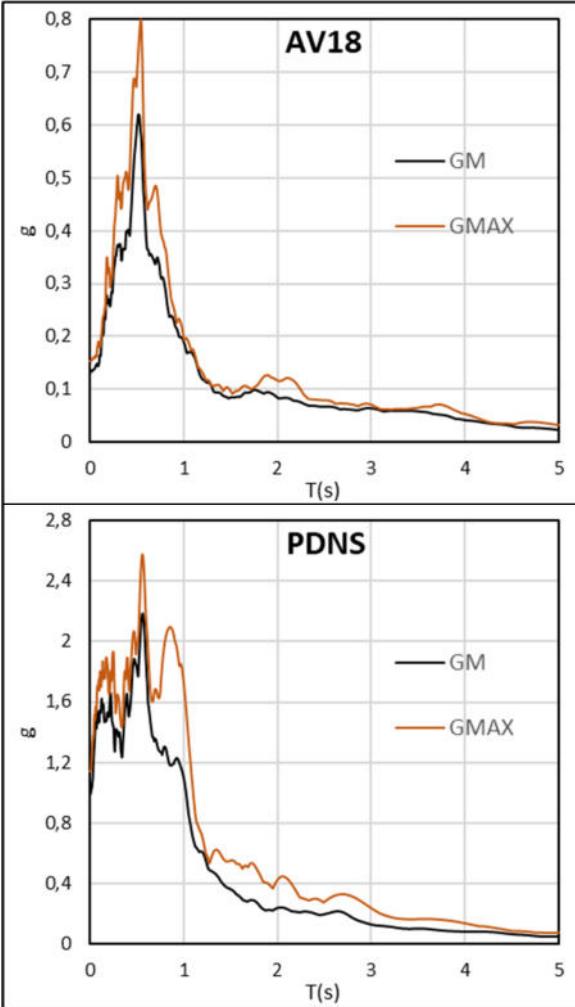
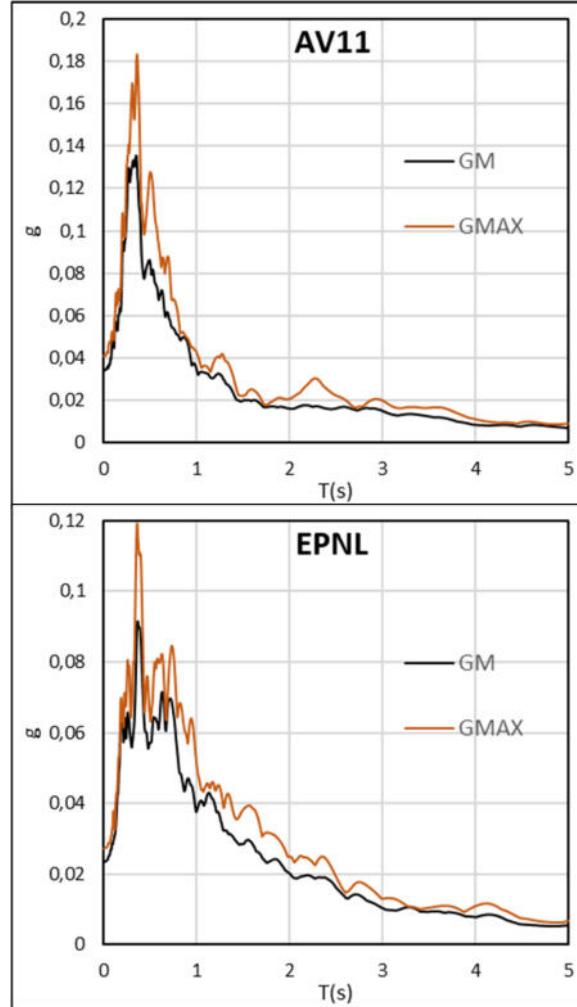
7.1.4. GM vs GMax



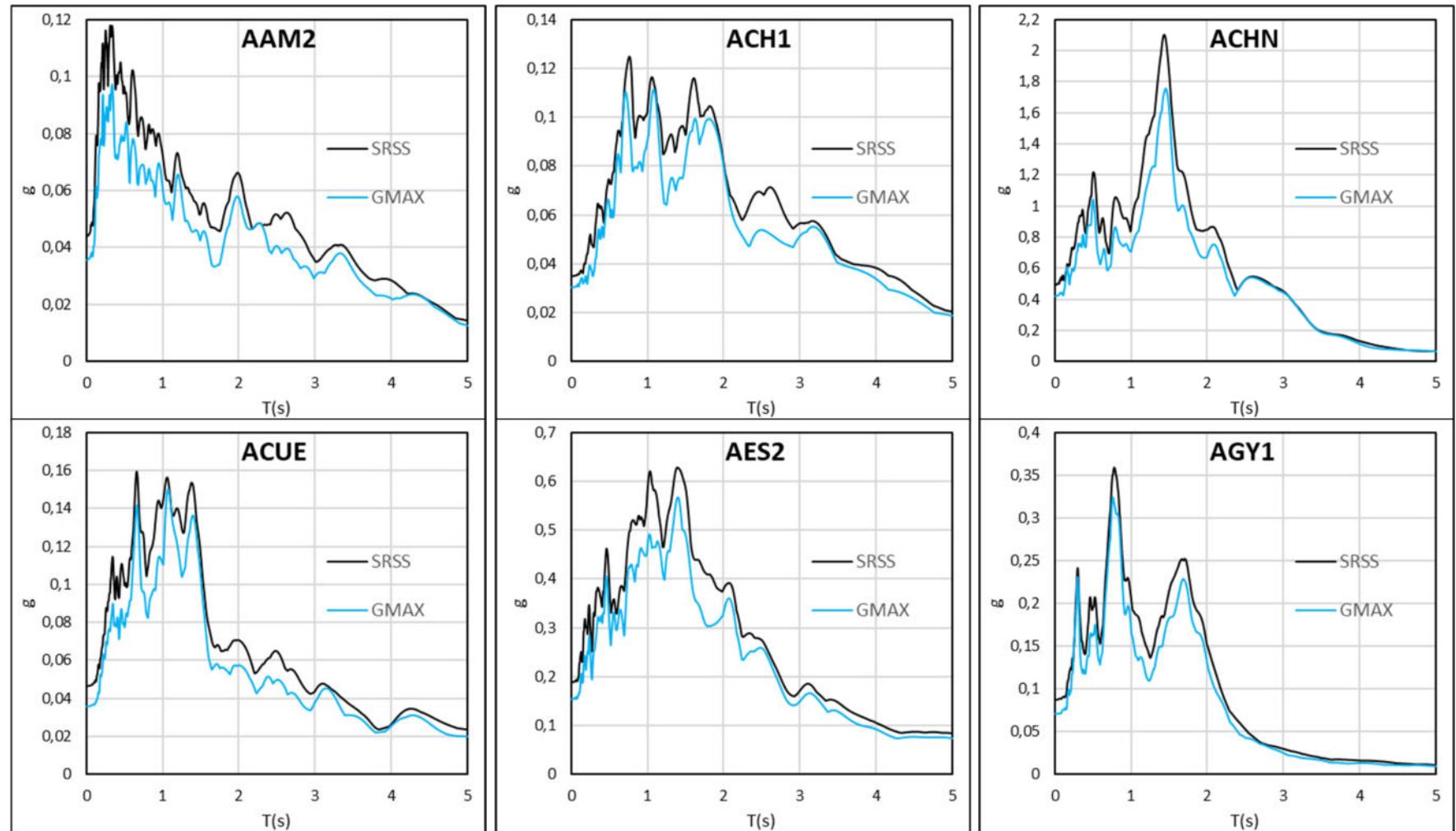


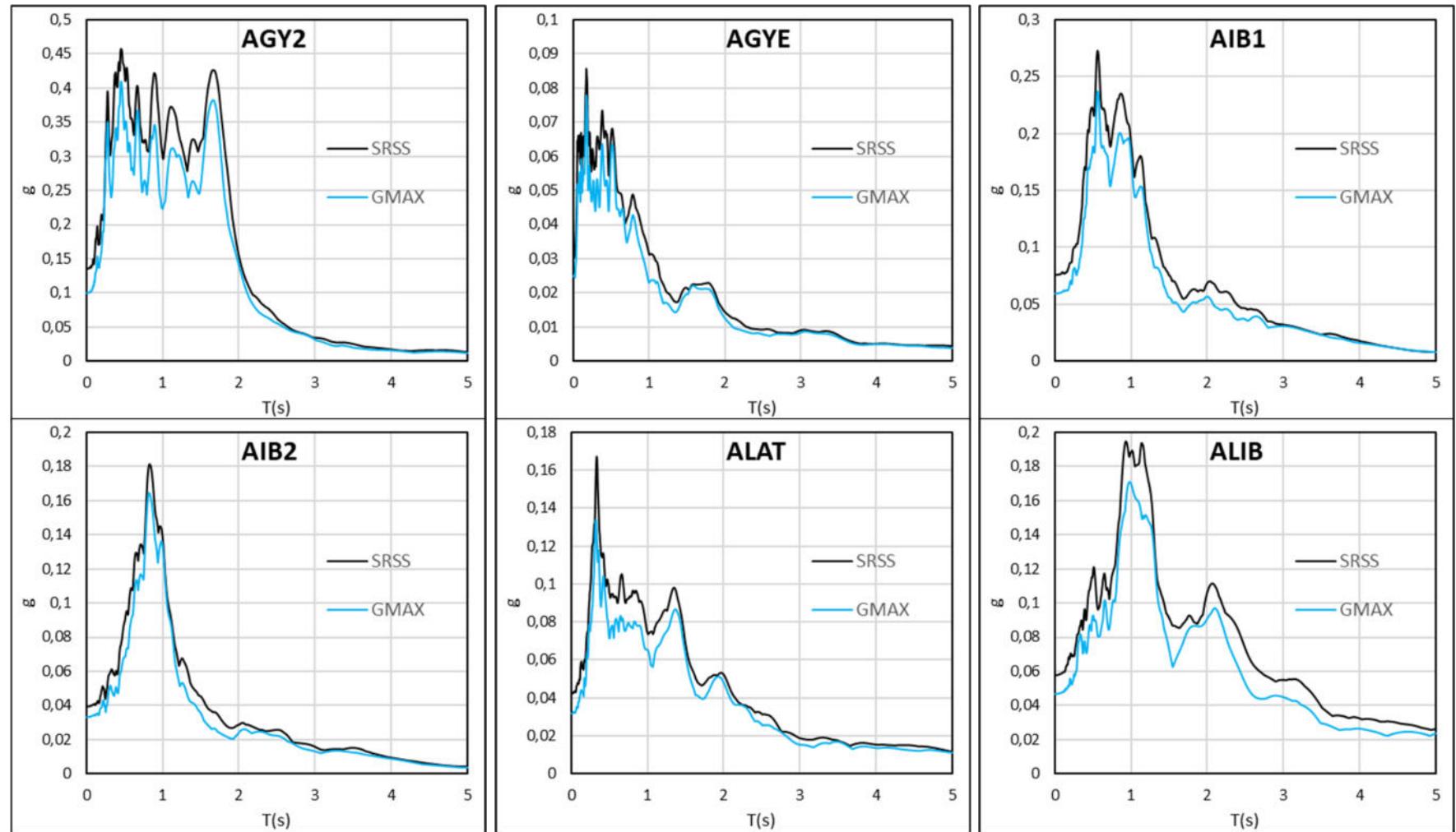


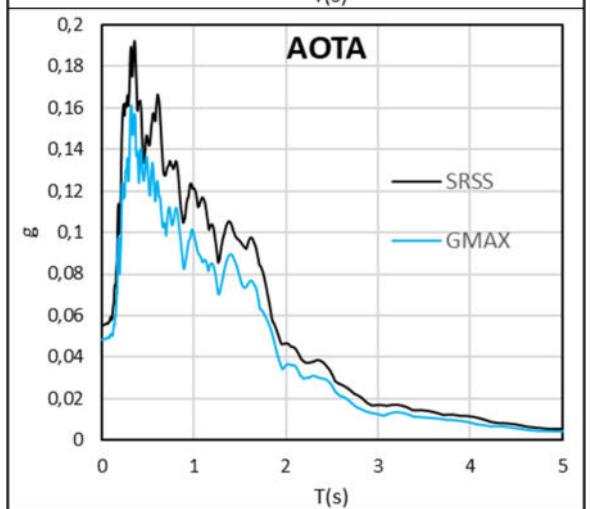
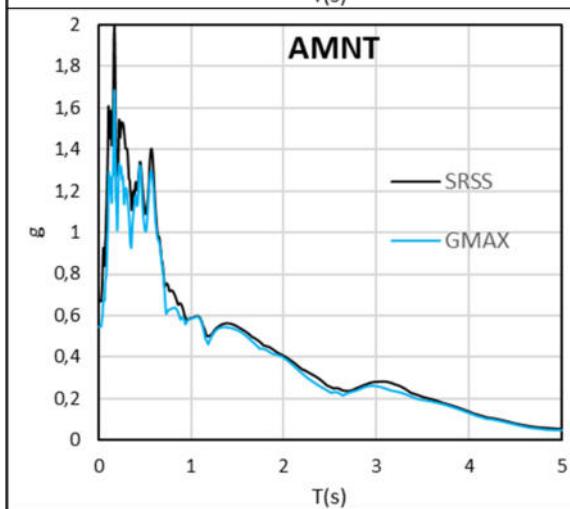
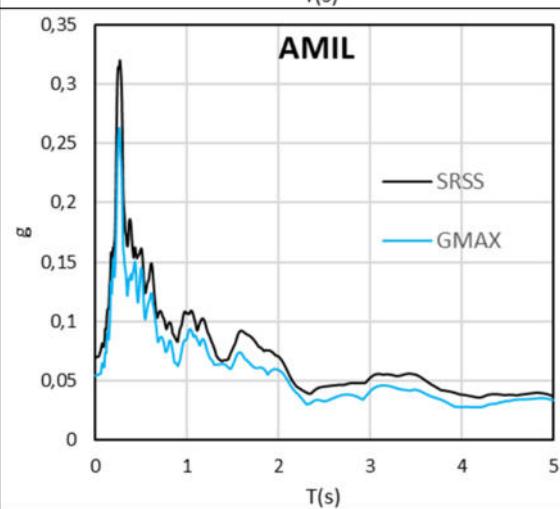
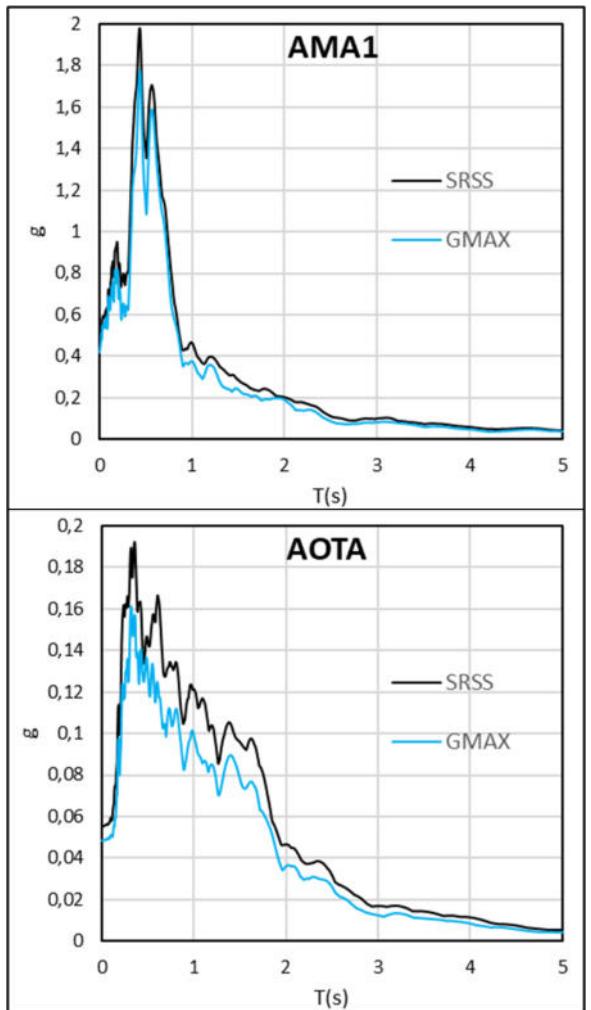
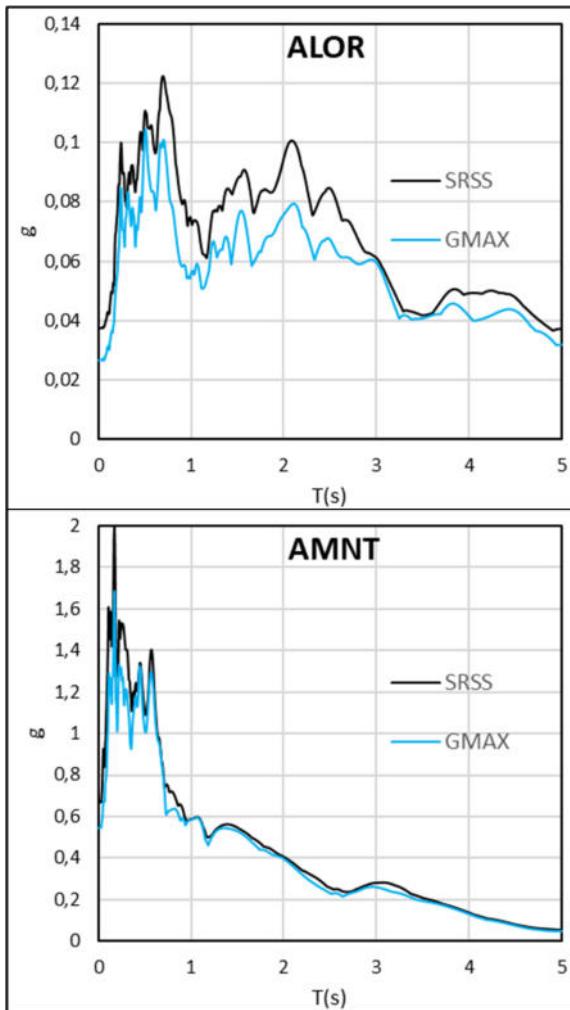
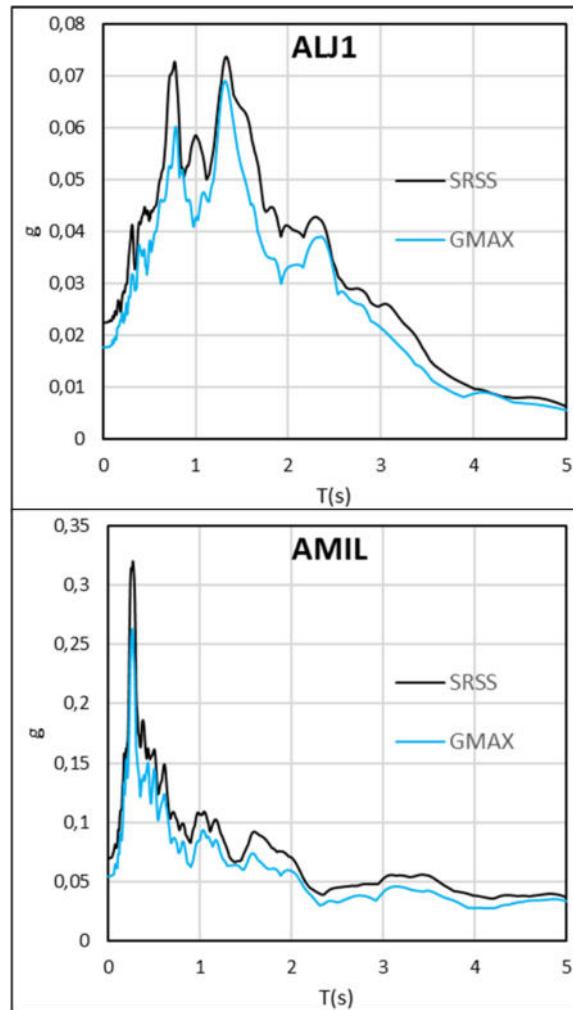


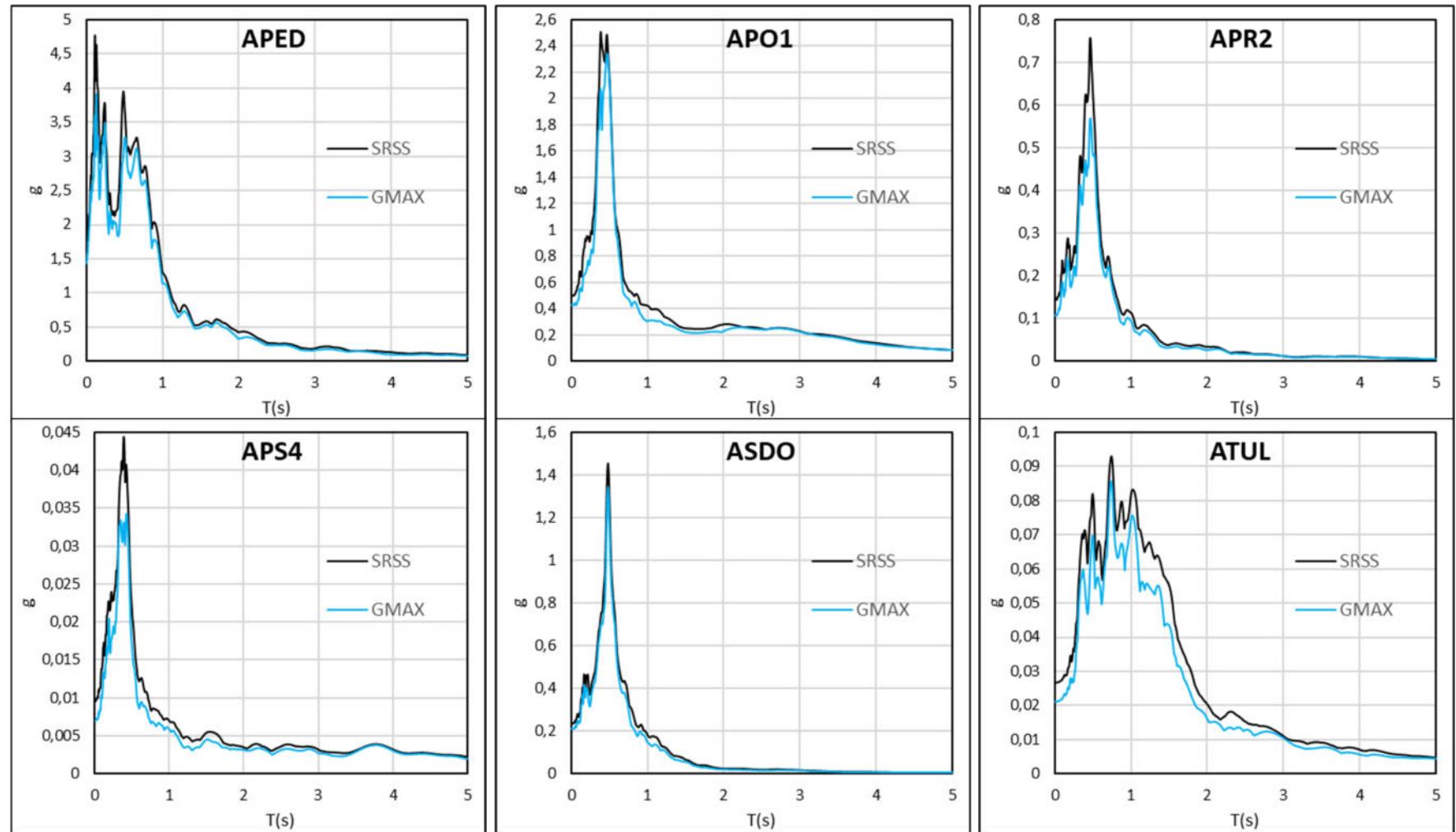


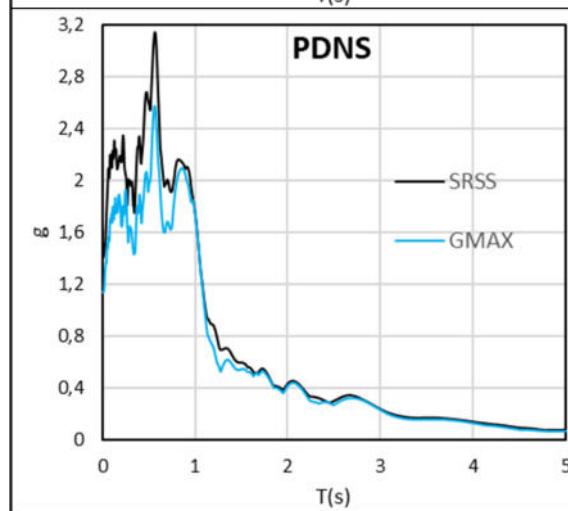
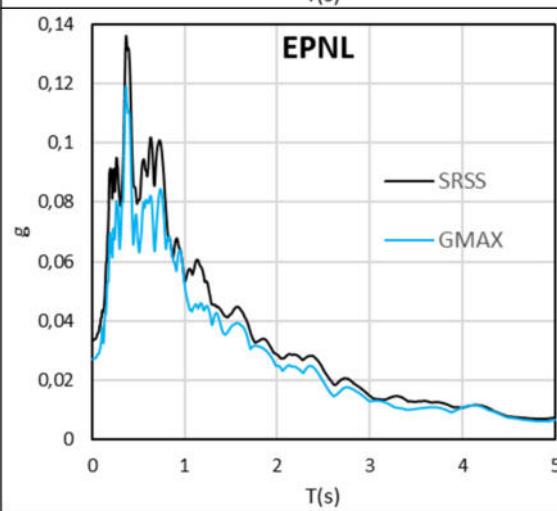
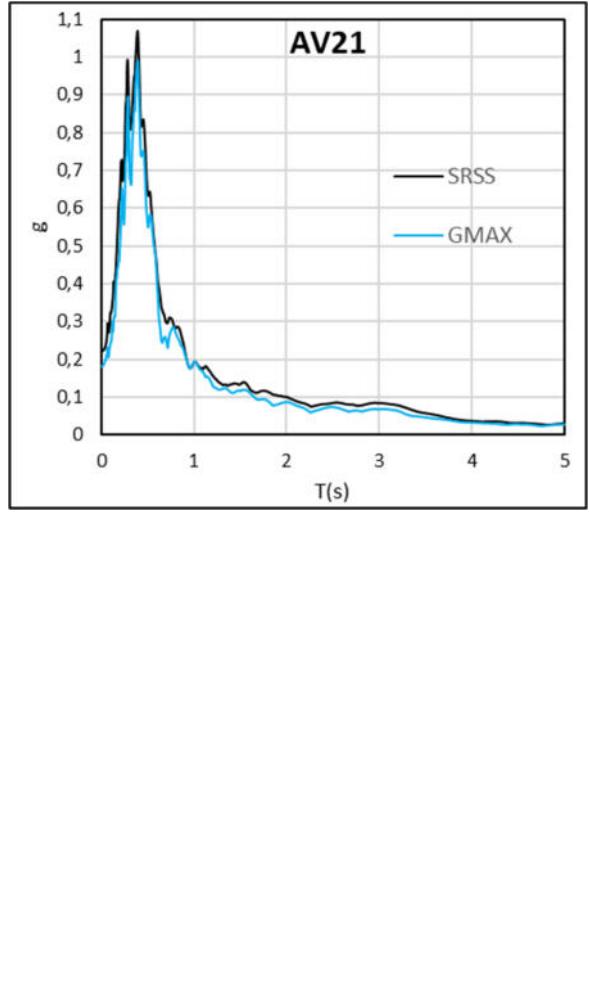
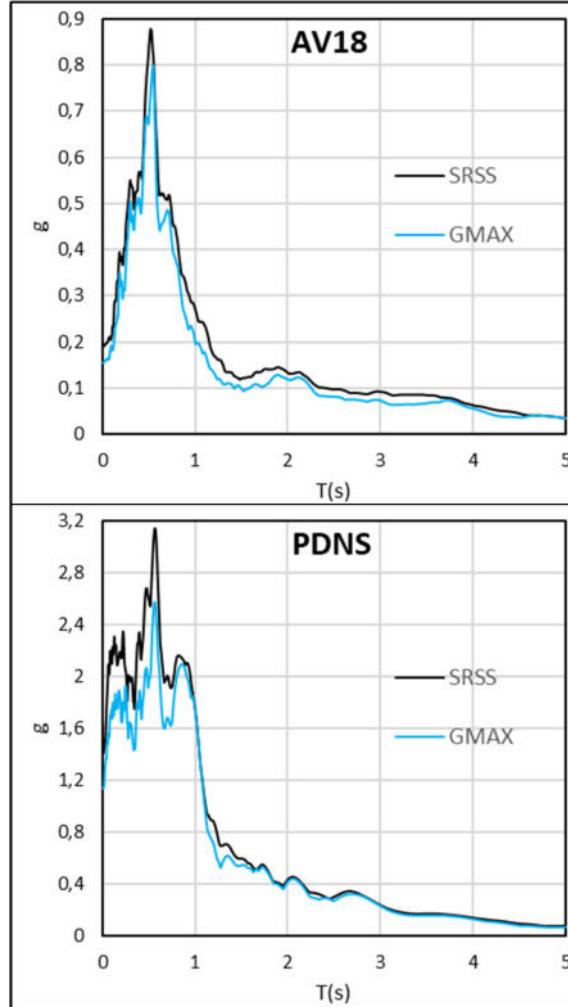
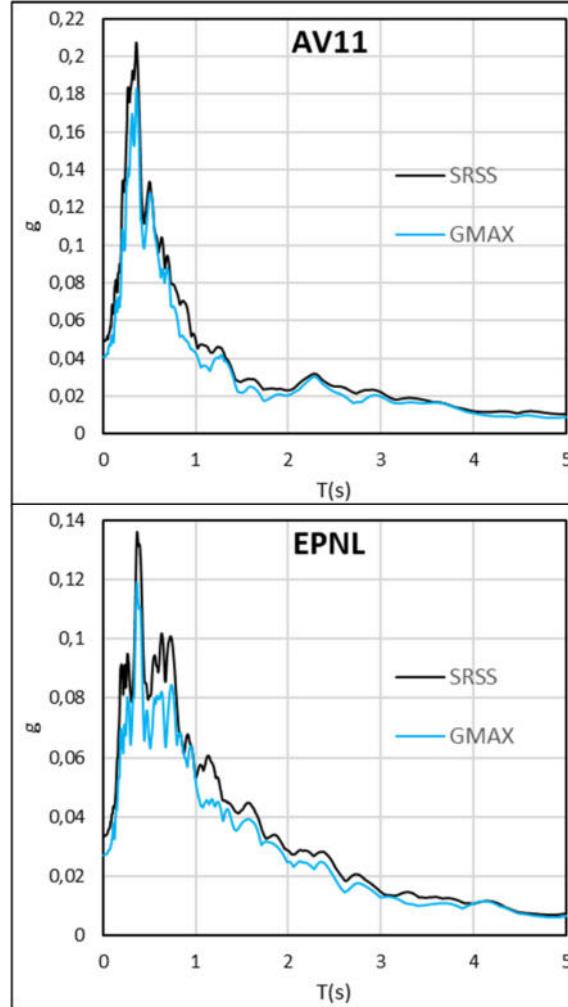
7.1.5. SRSS vs GMax



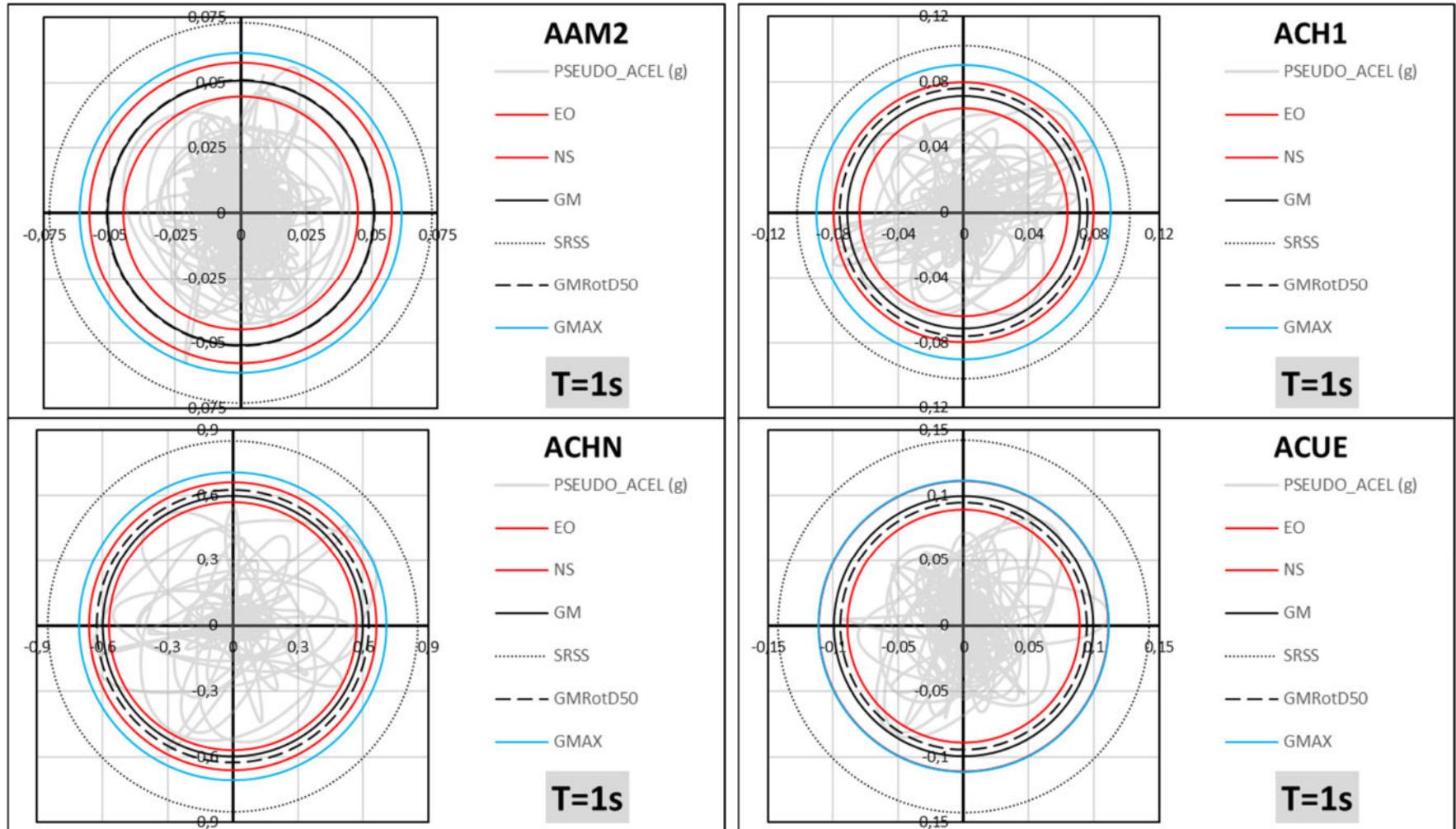


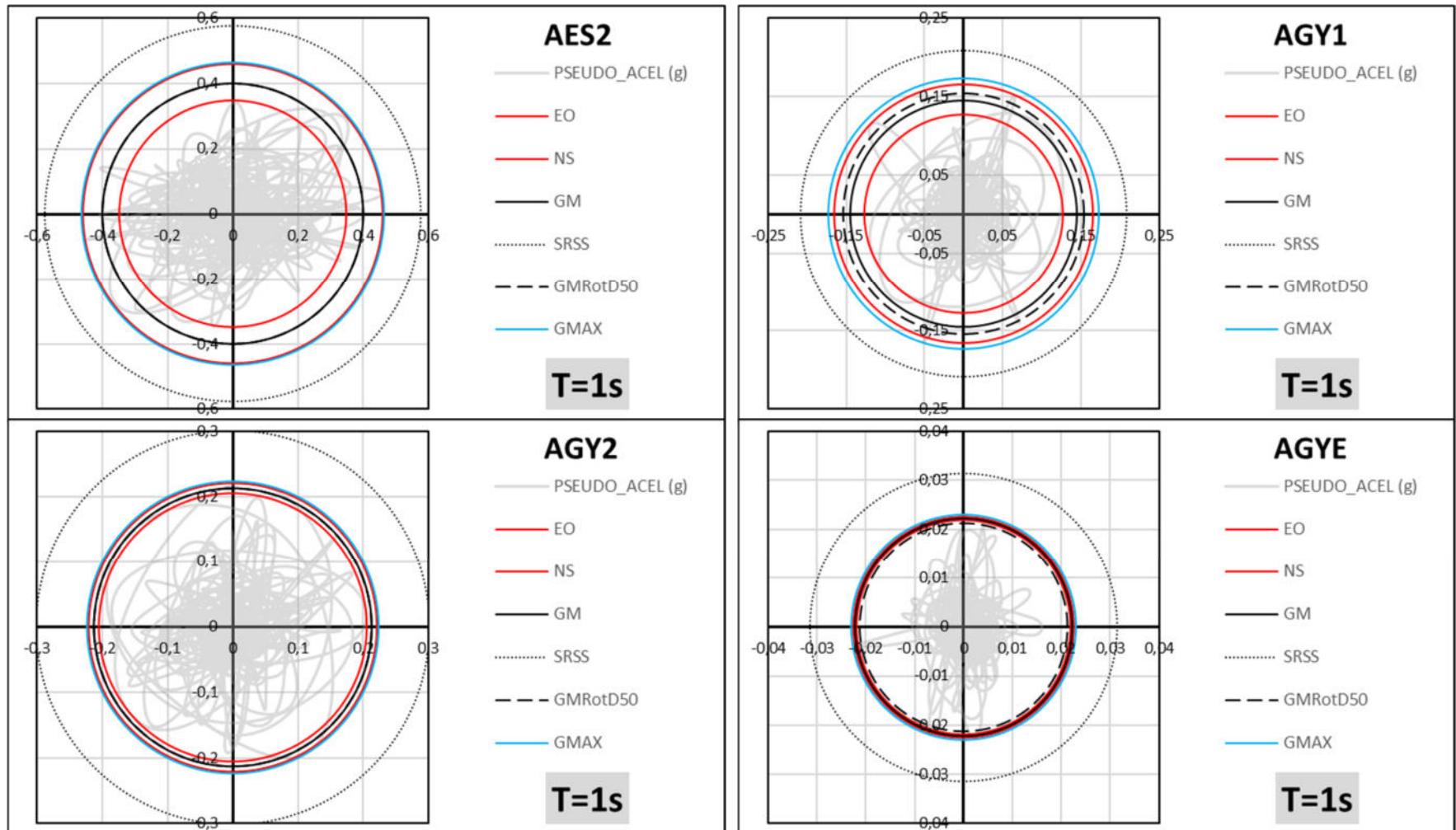


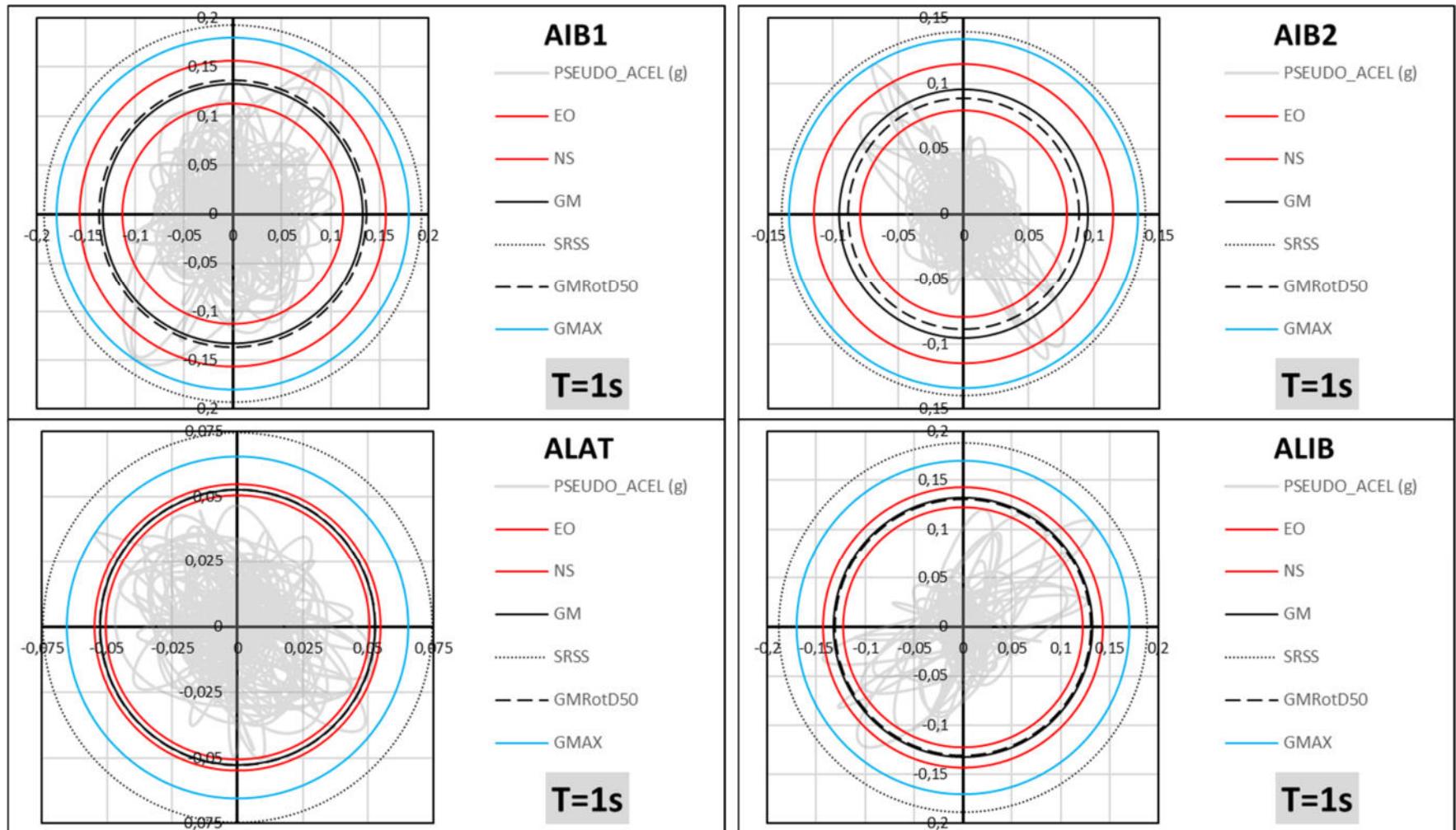


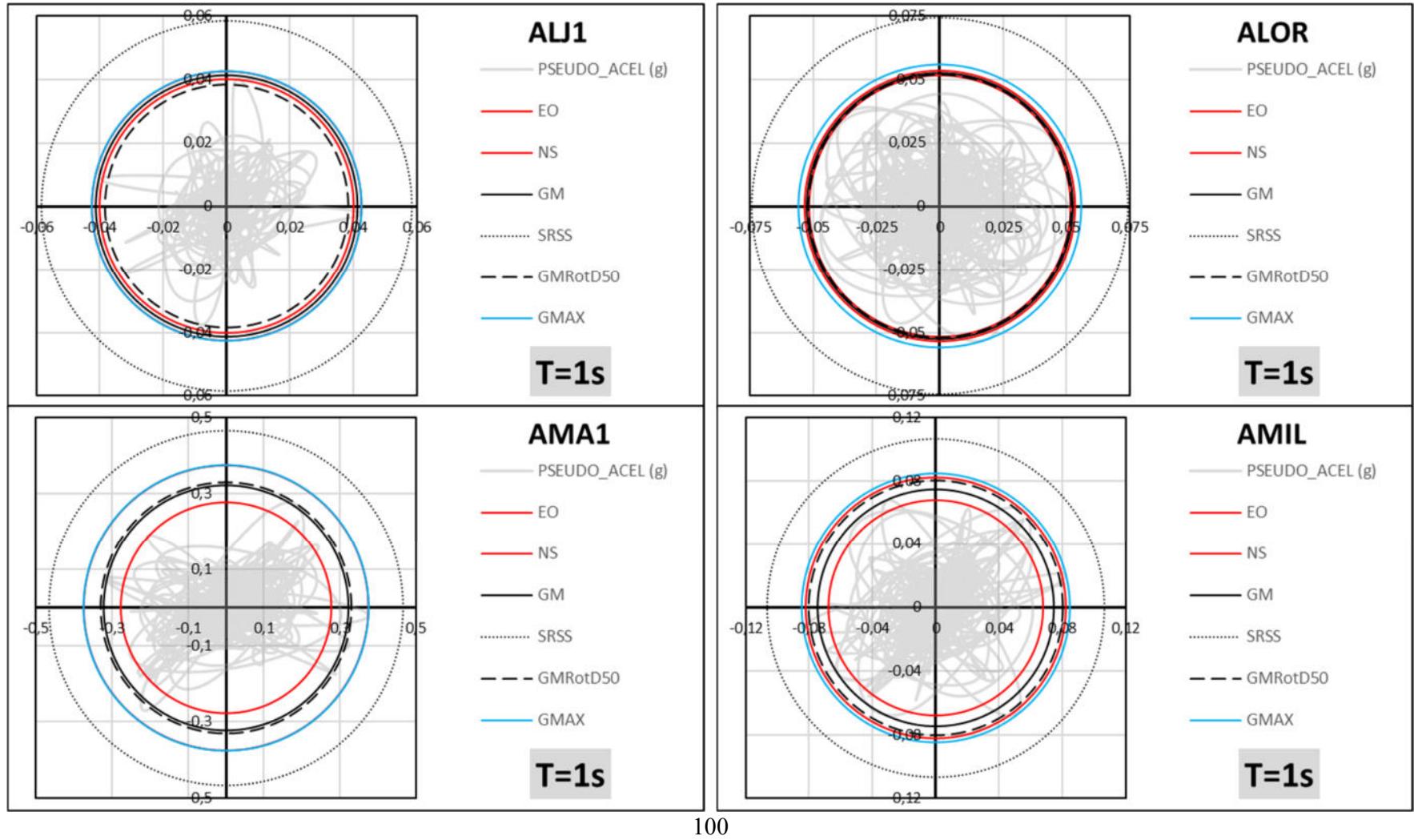


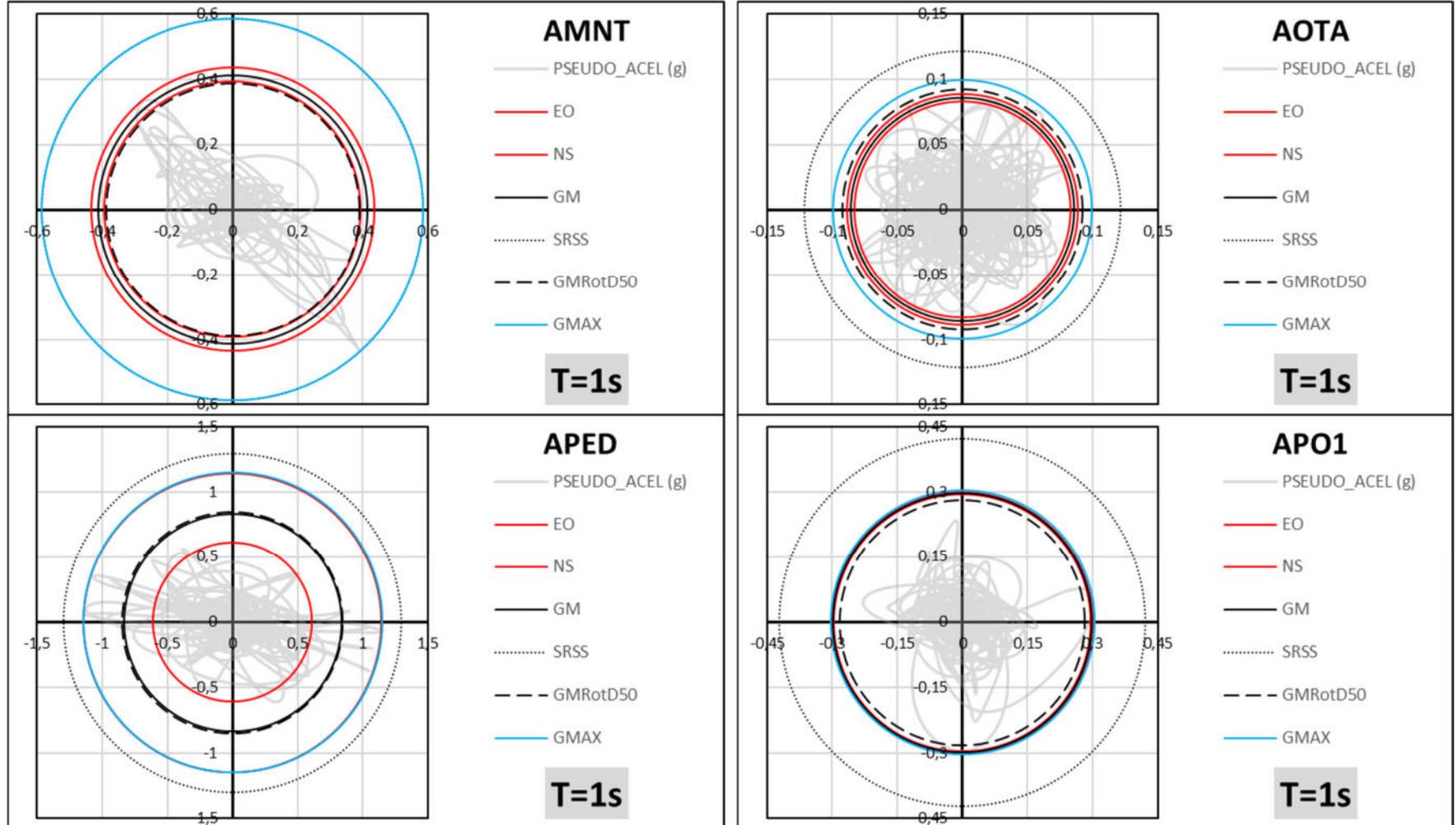
7.1.6. Respuesta de Pseudo Aceleraciones para T=1seg (EO, NS, SRSS, GMax, GM y GMRotD50)

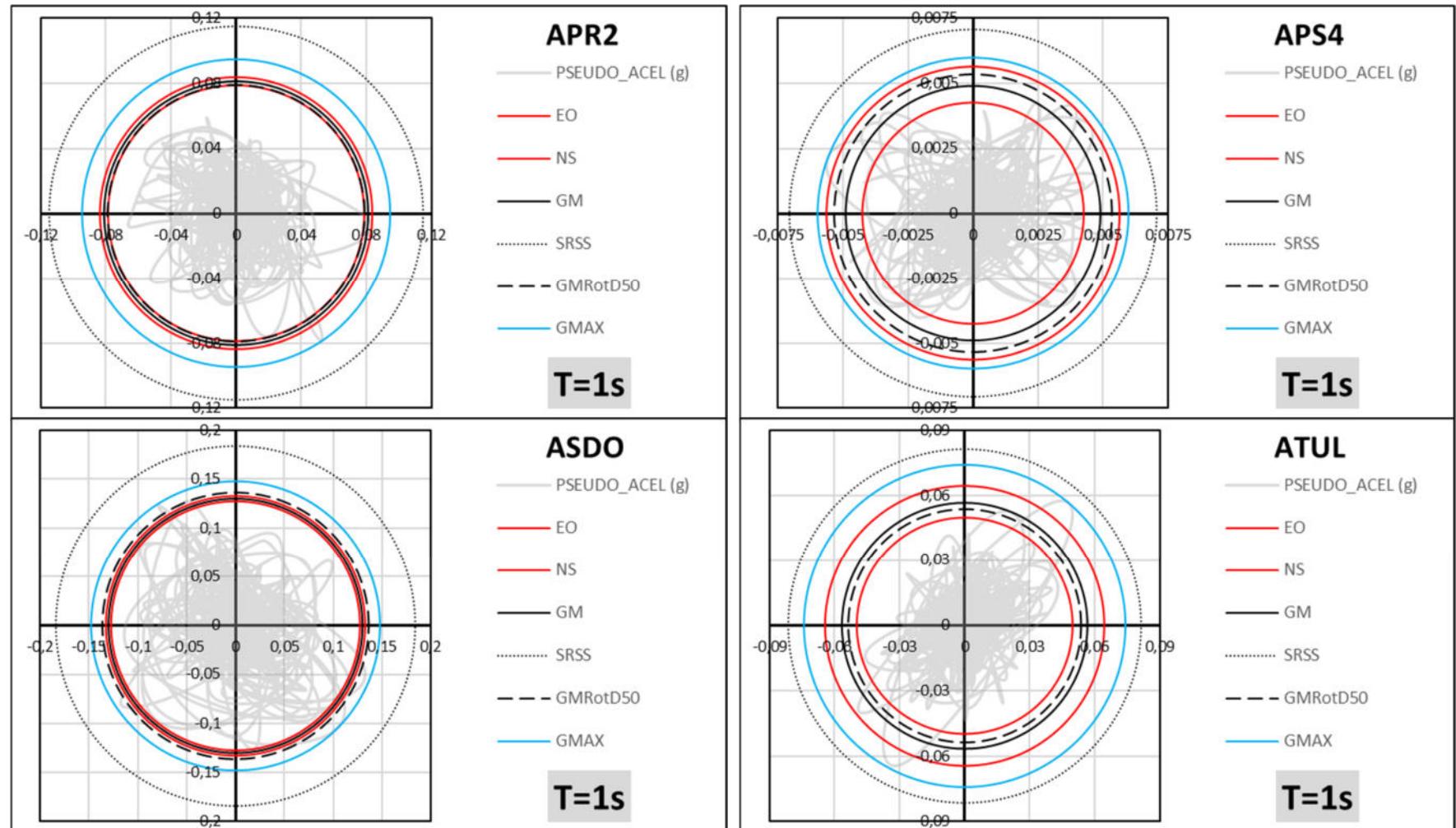


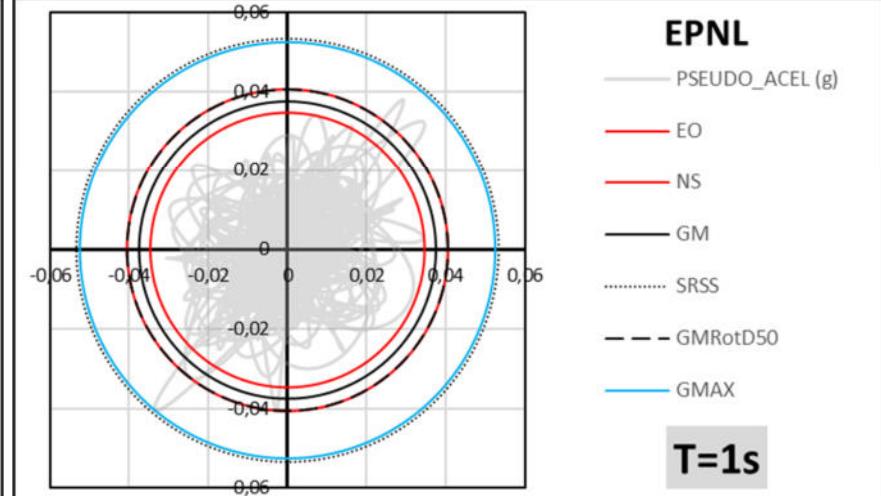
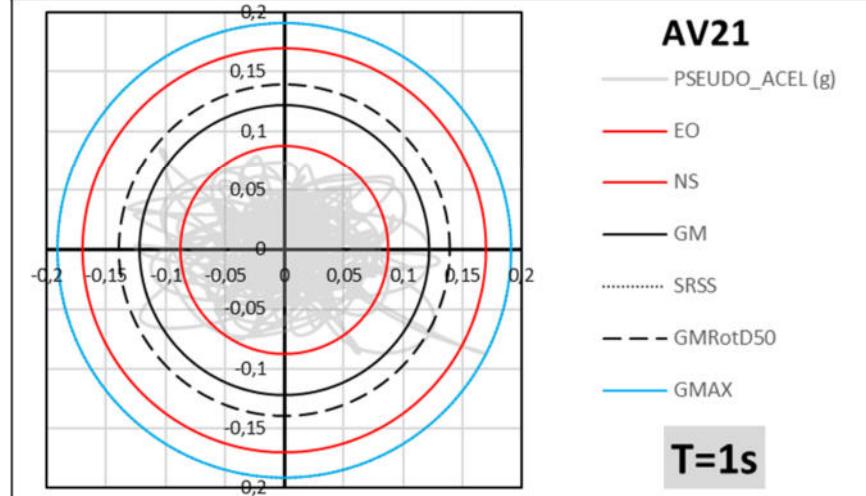
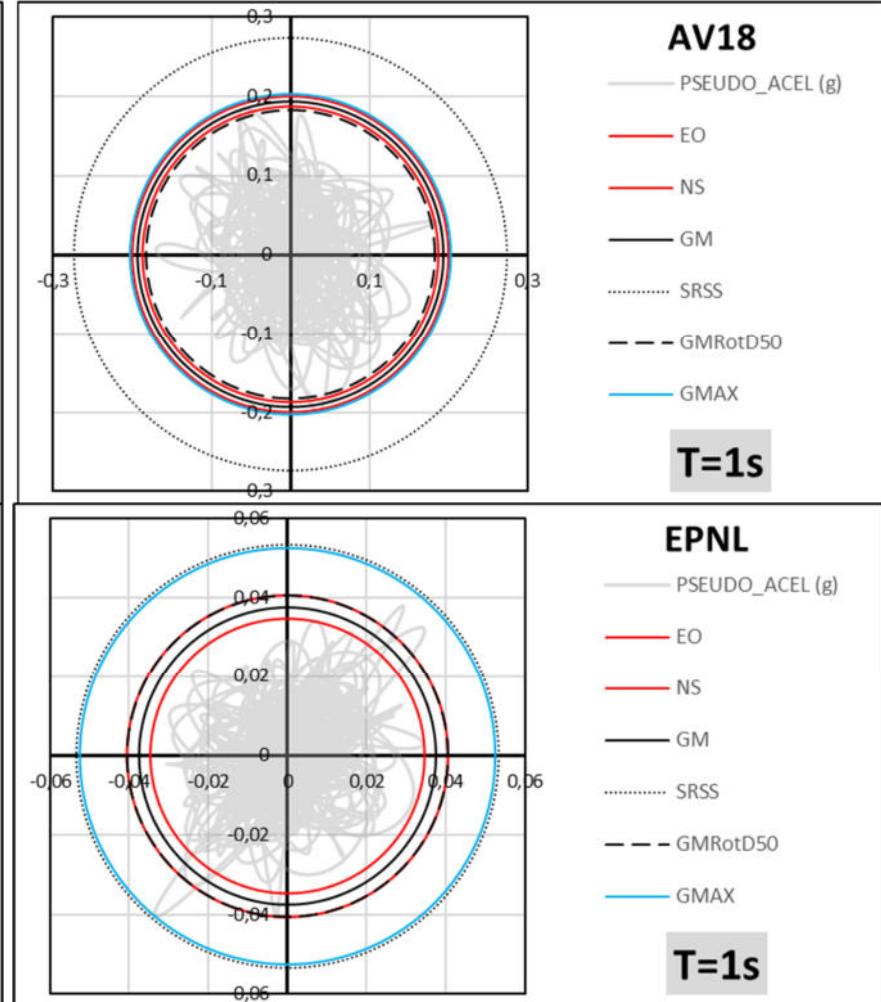
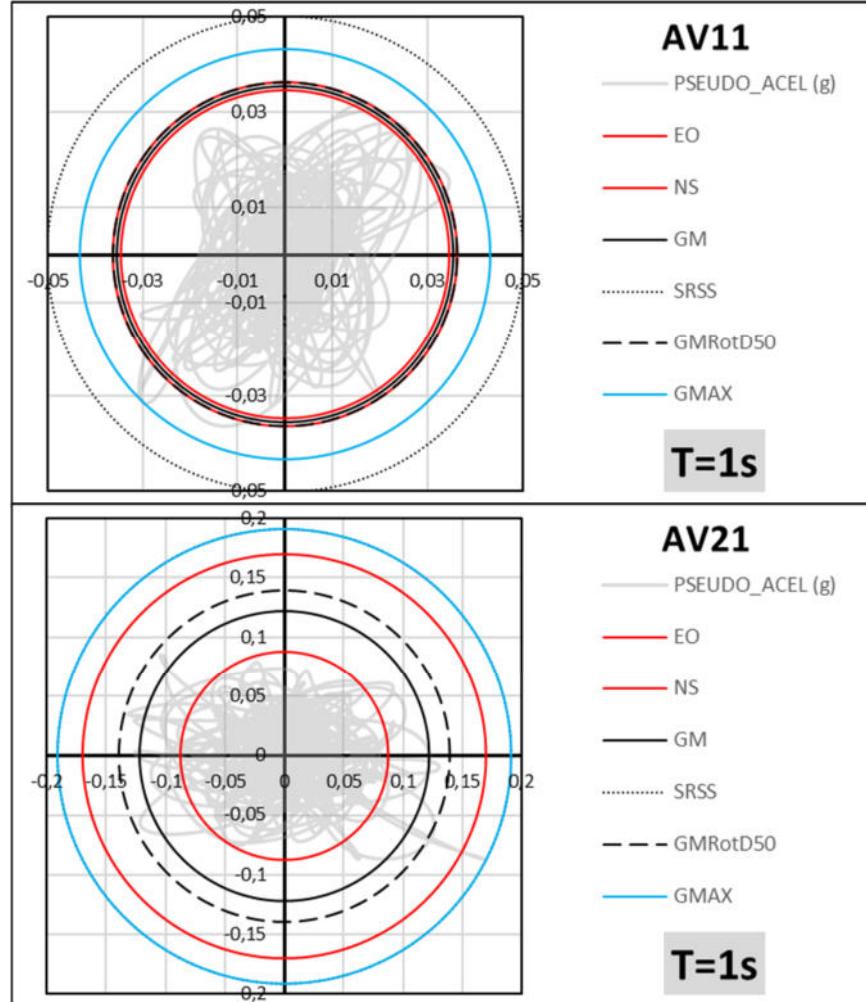


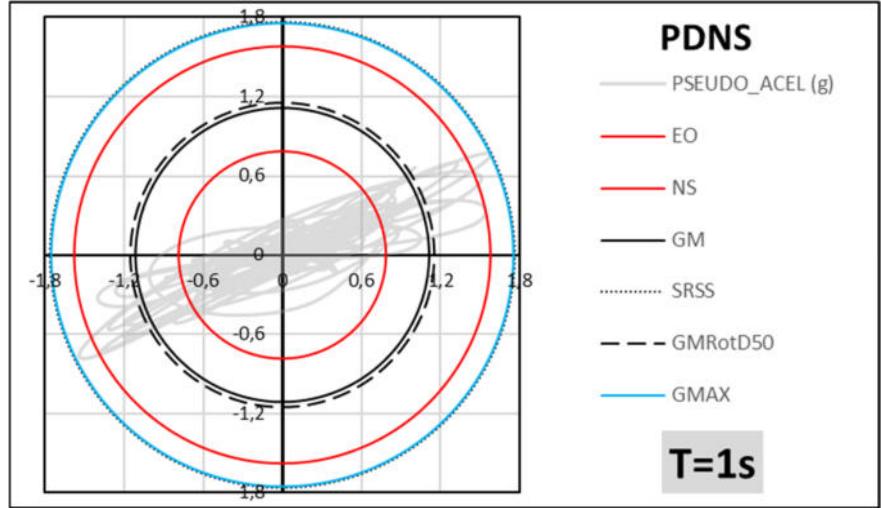




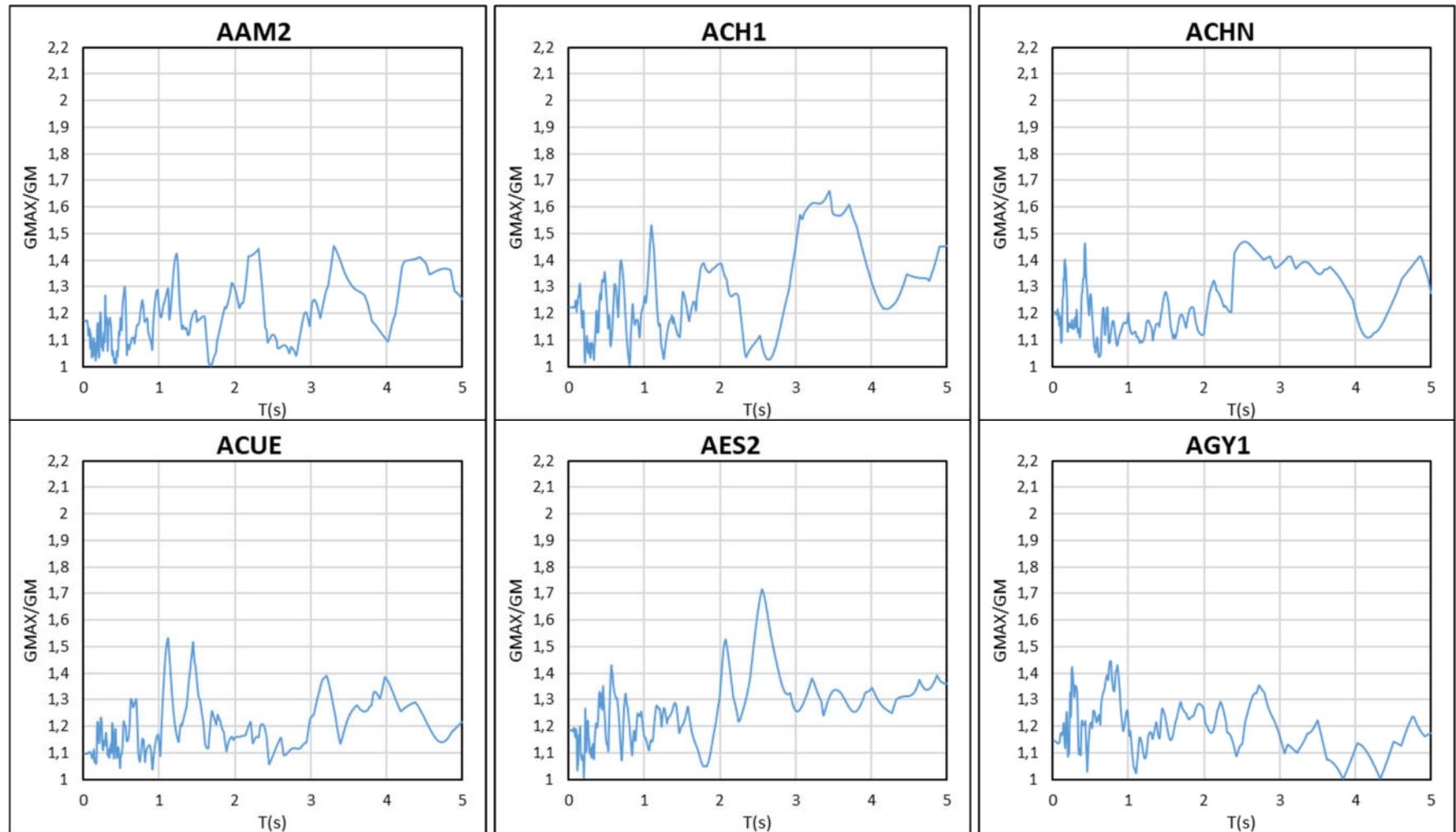


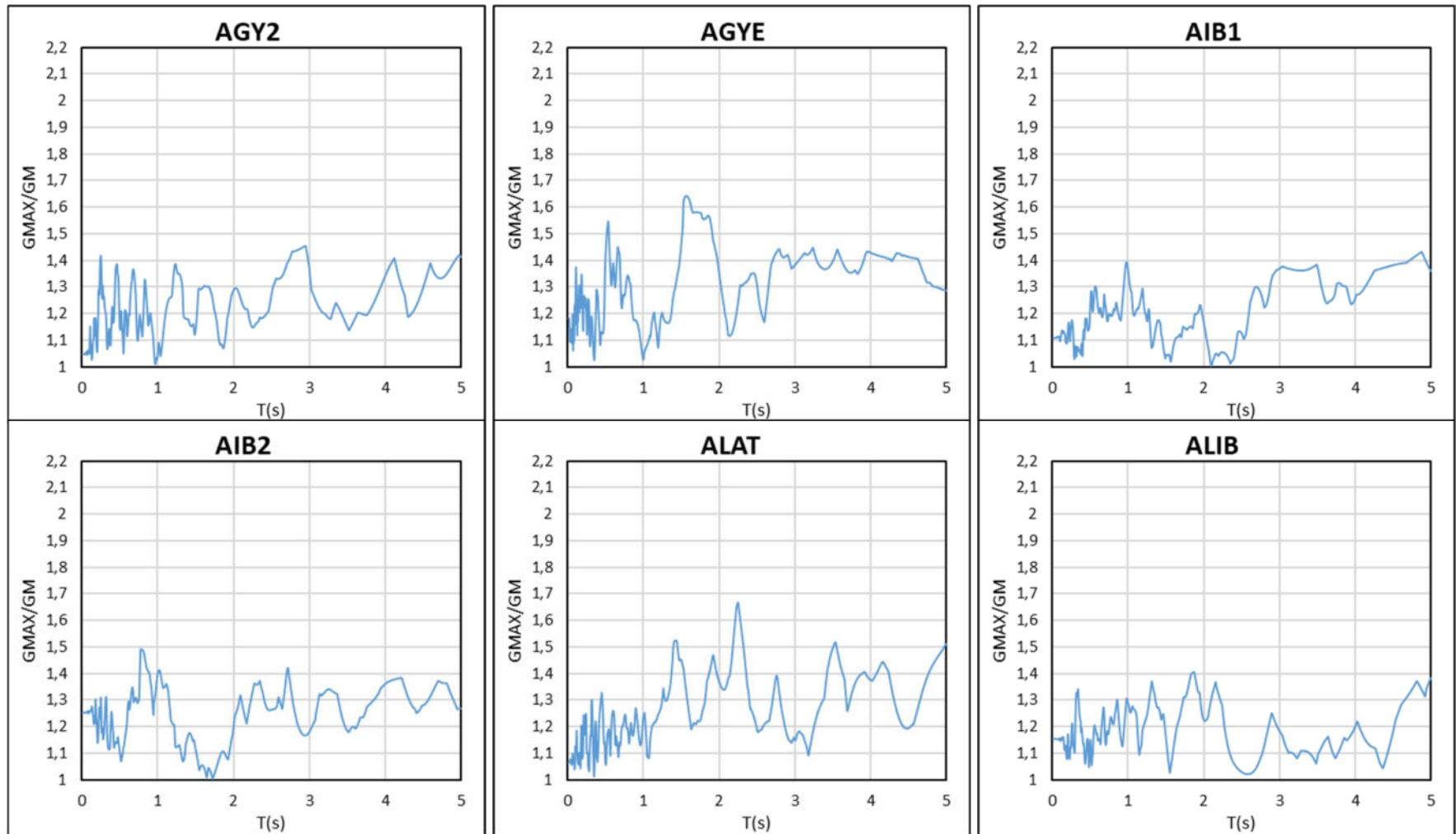


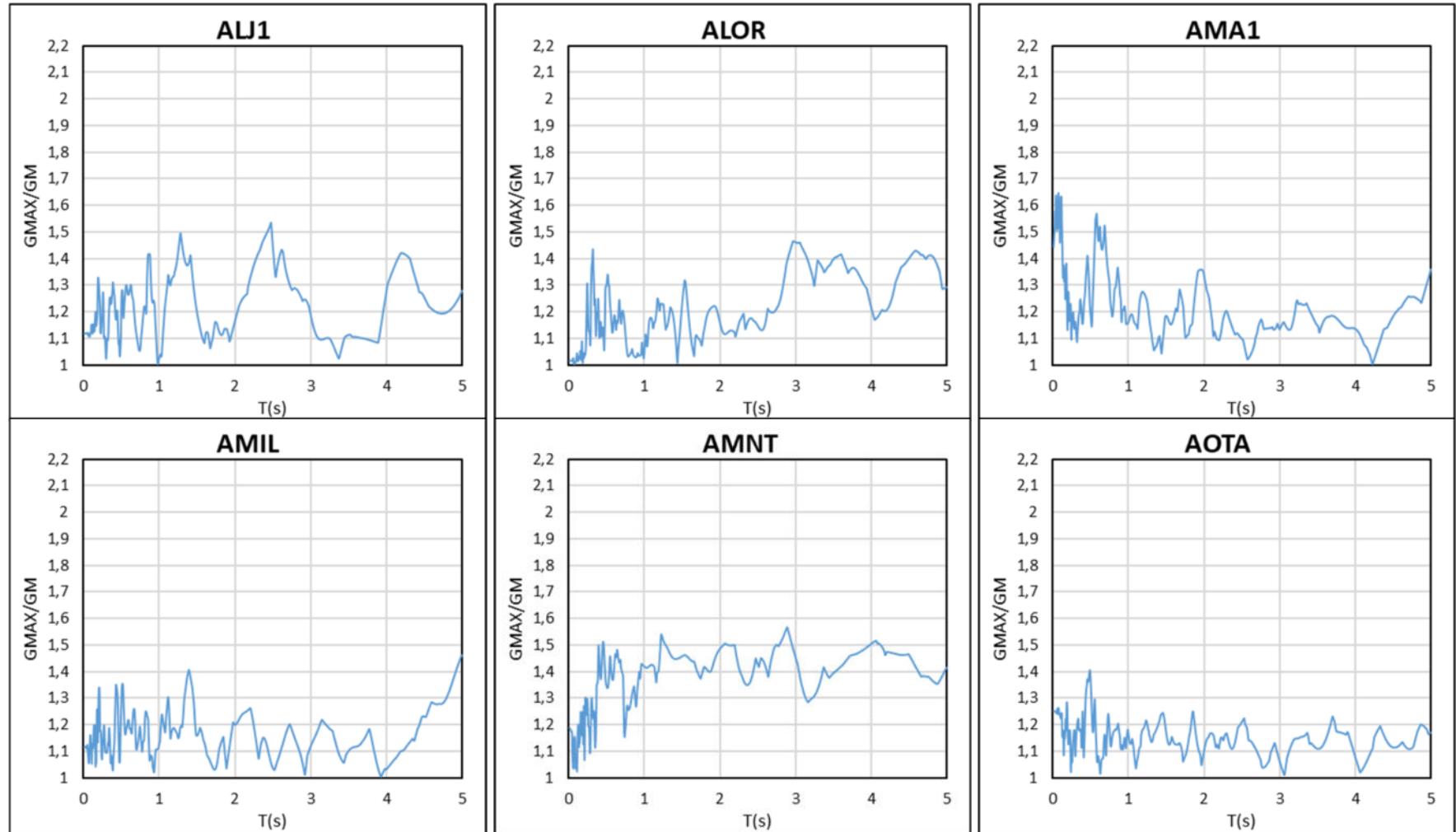


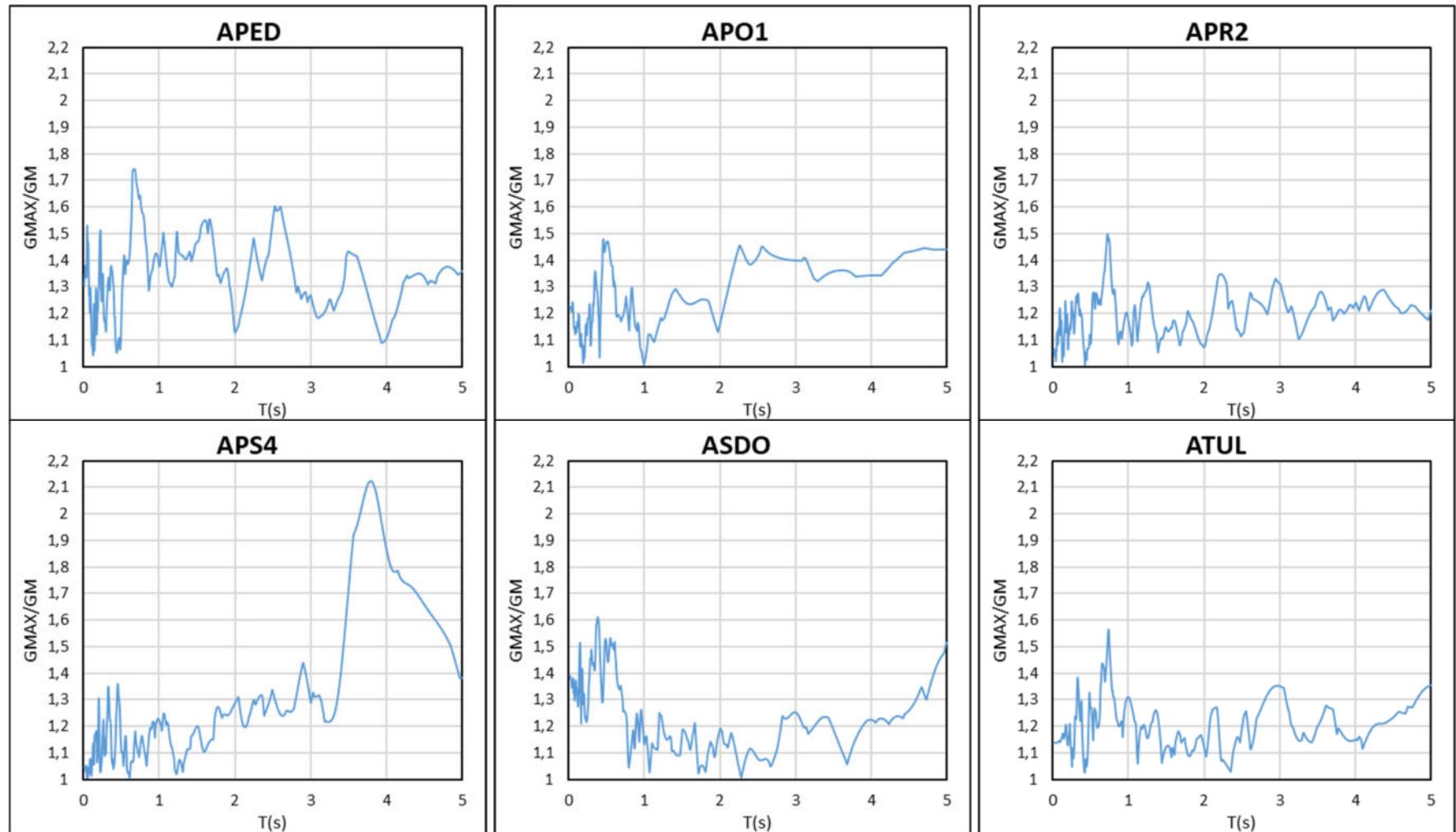


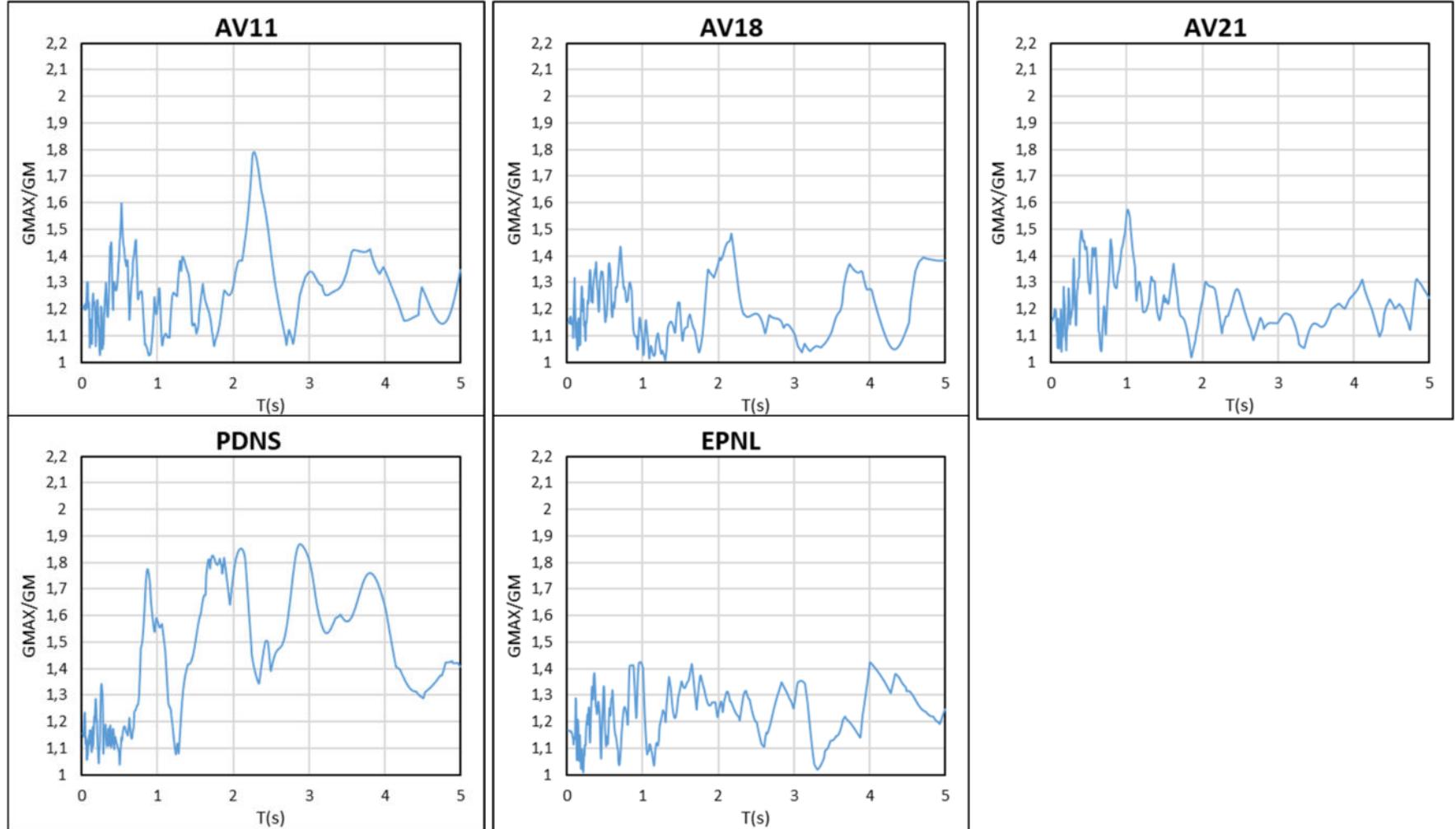
7.1.7. GMax/GM



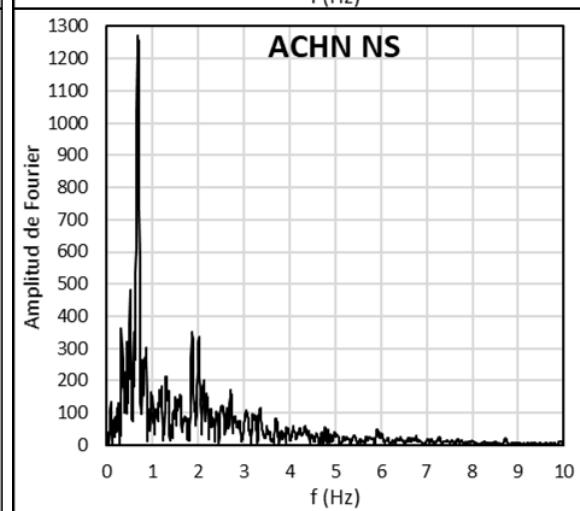
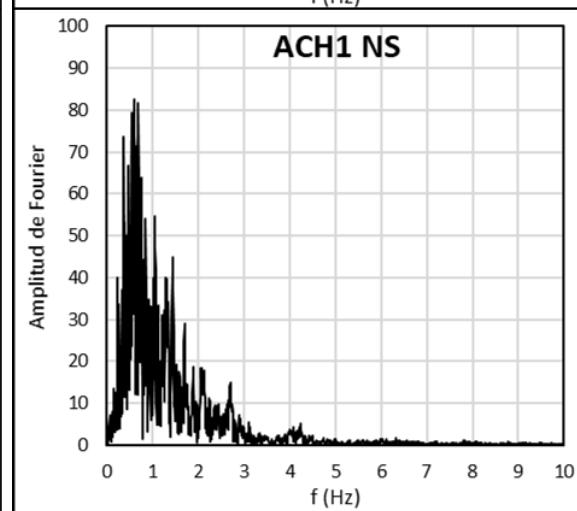
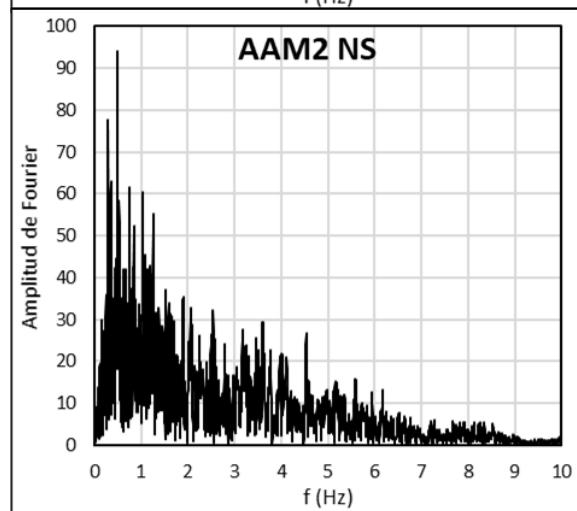
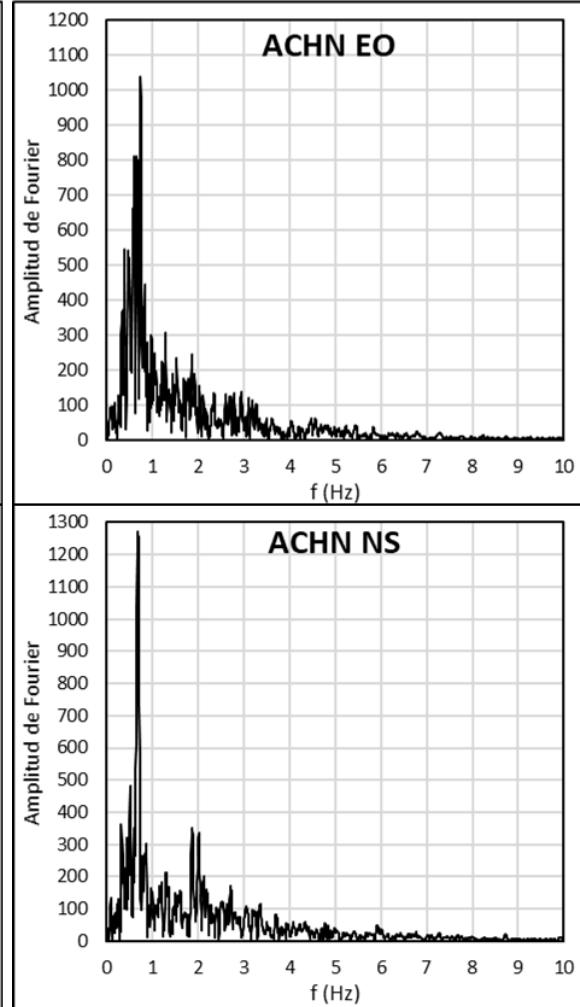
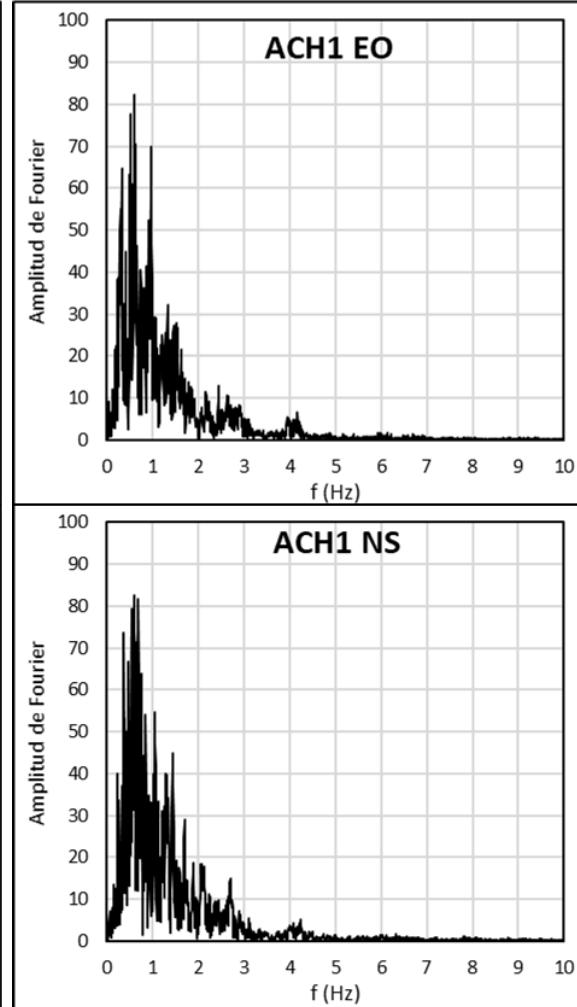
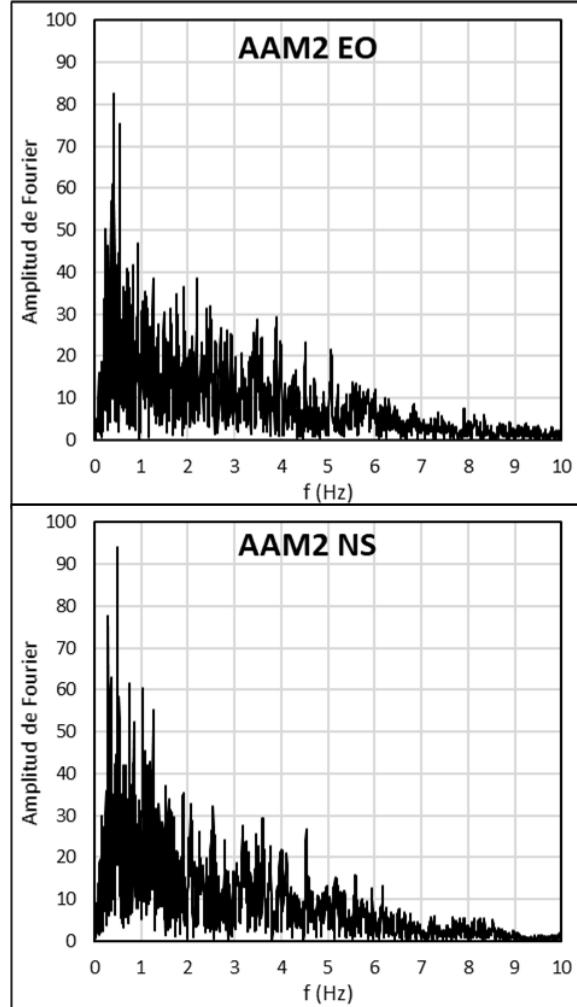


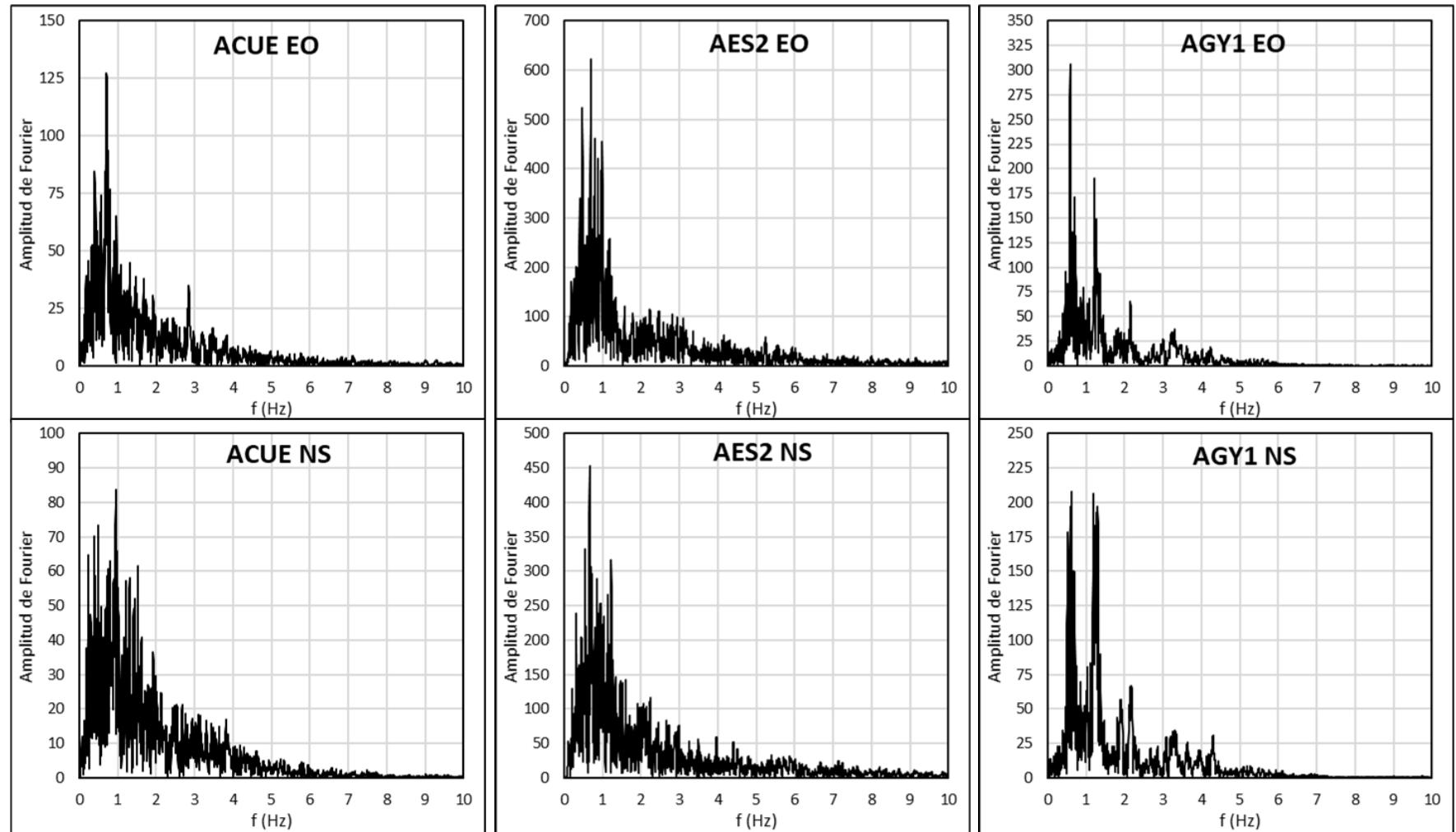


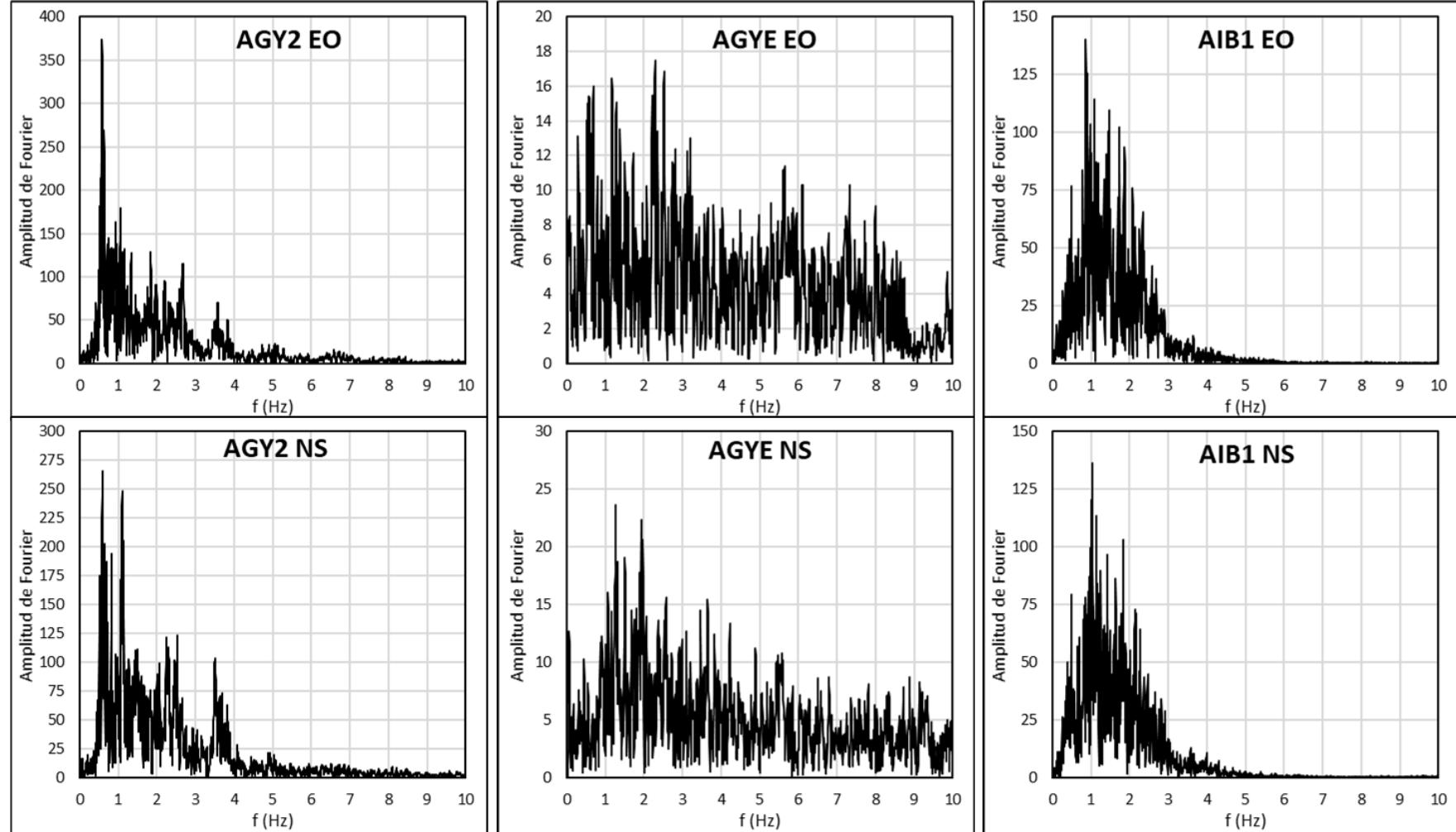


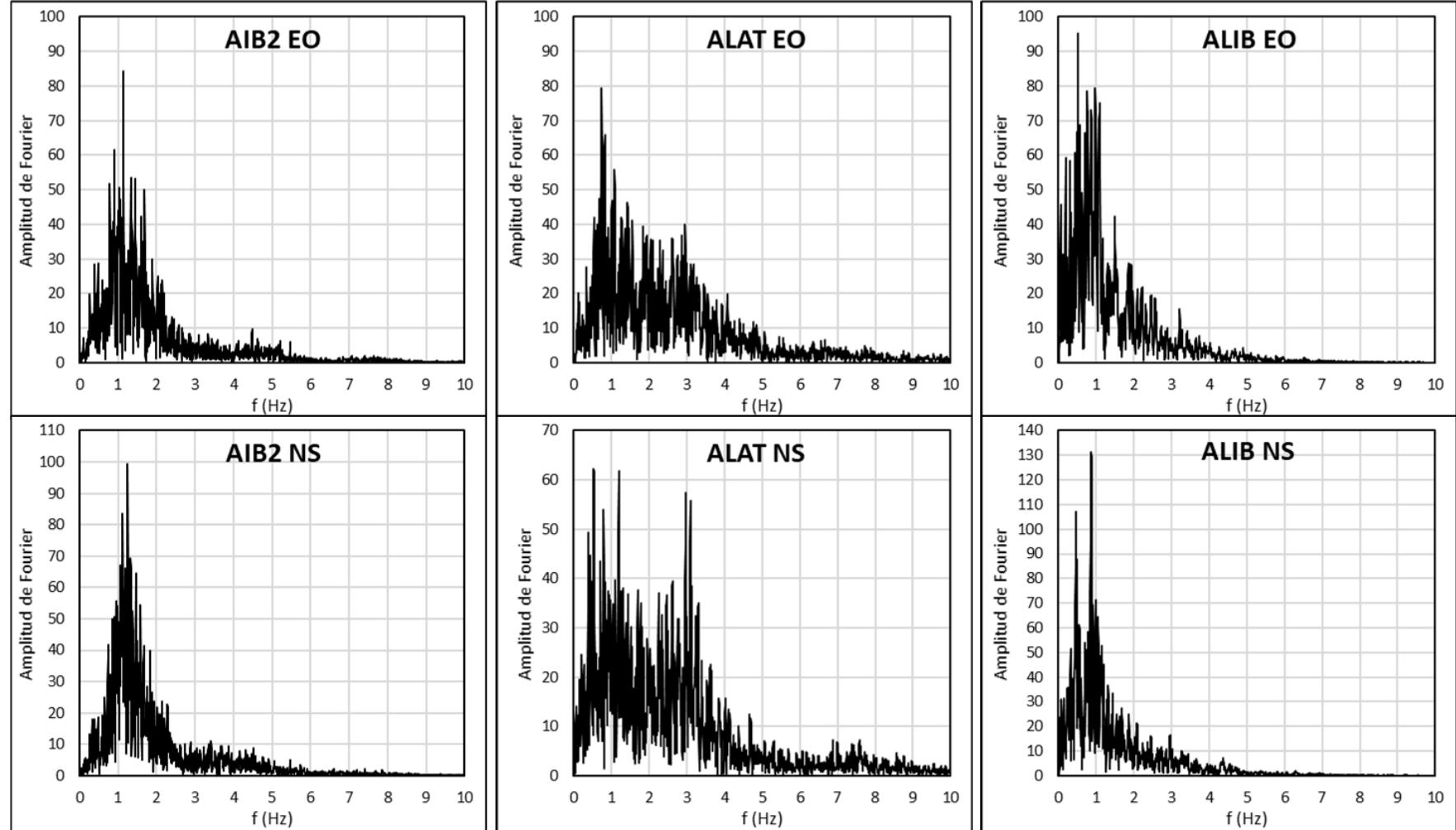


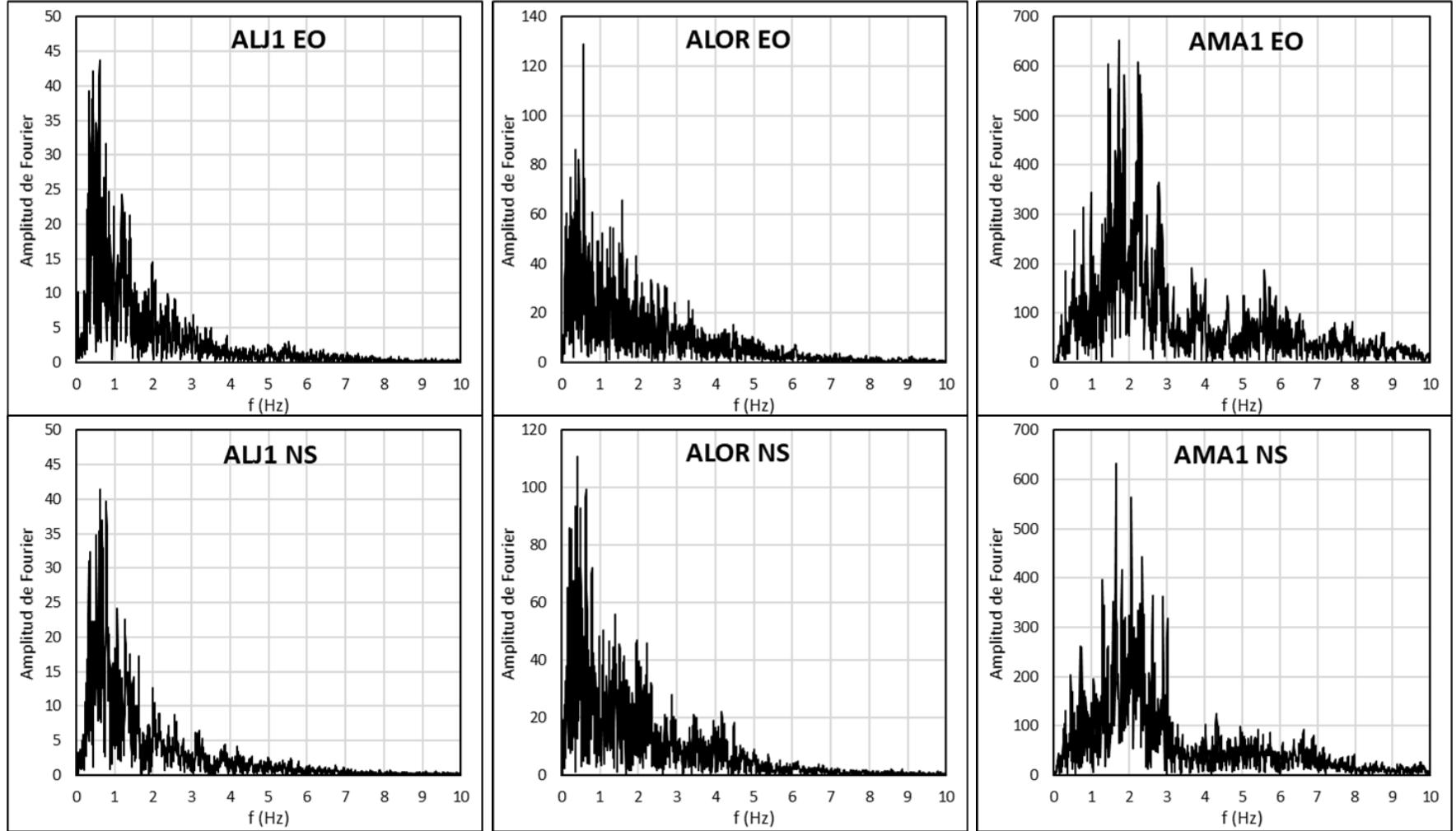
7.1.8. Espectro de frecuencias

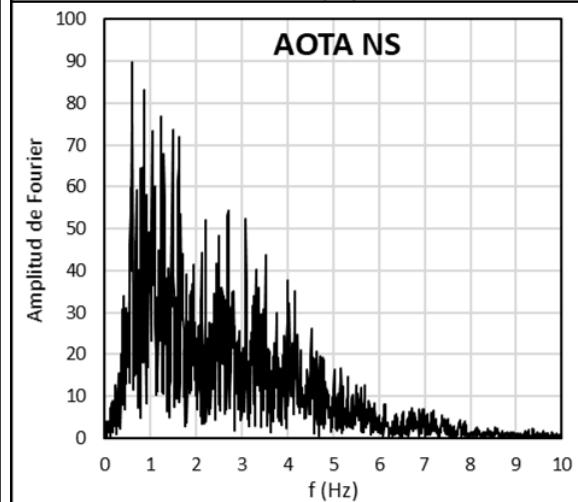
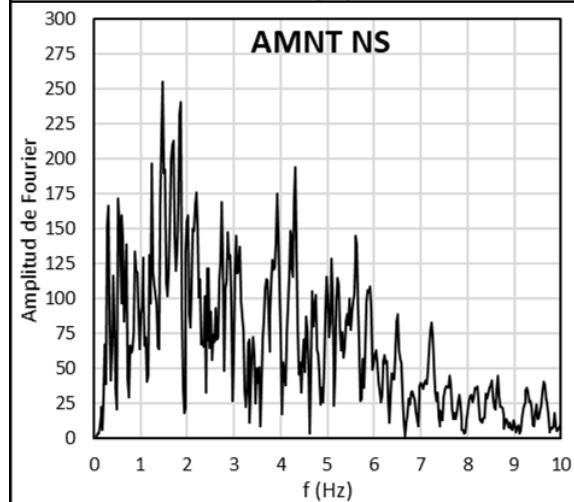
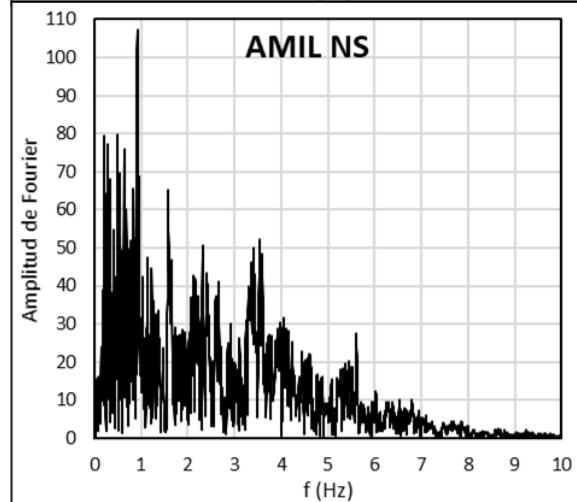
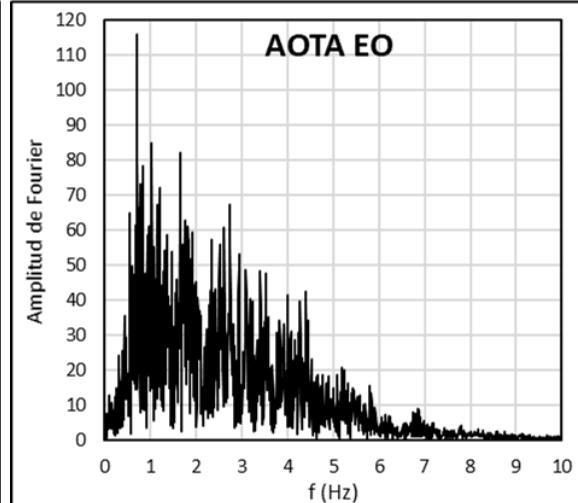
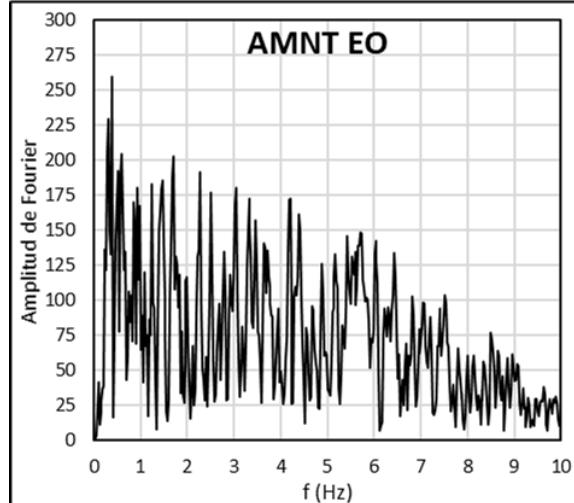
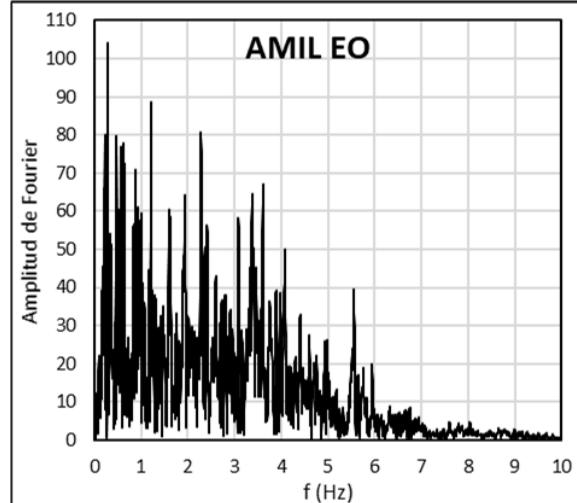


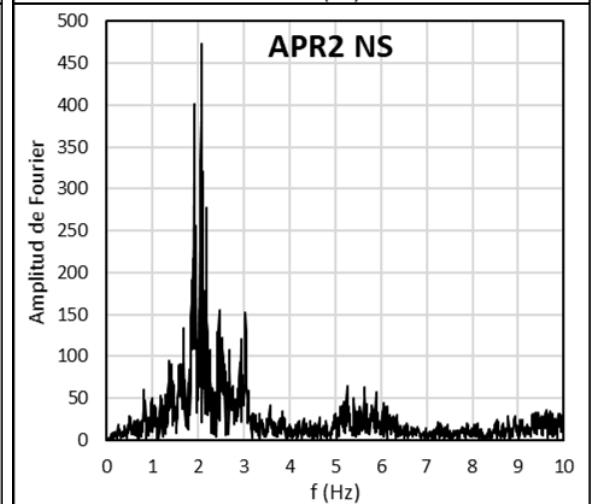
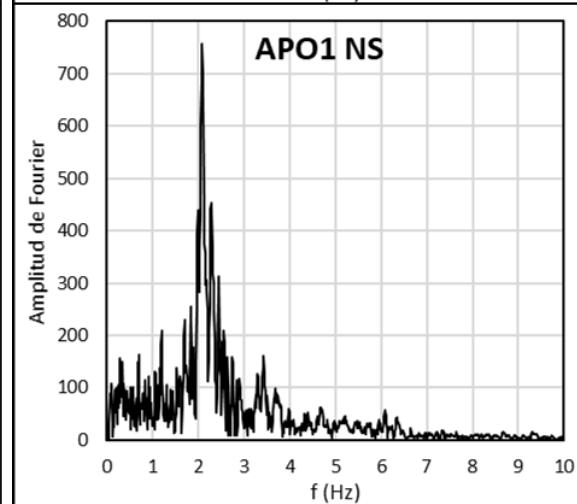
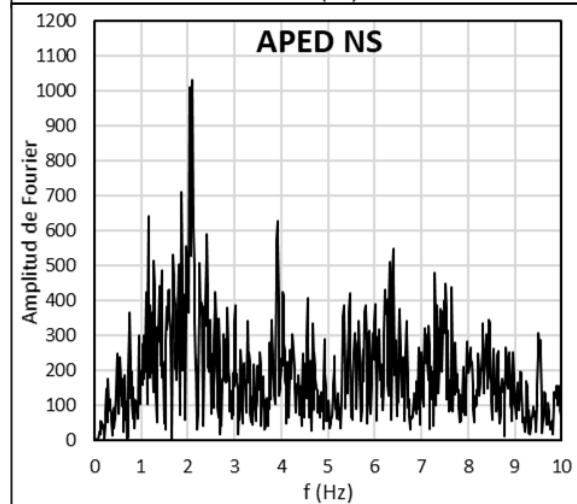
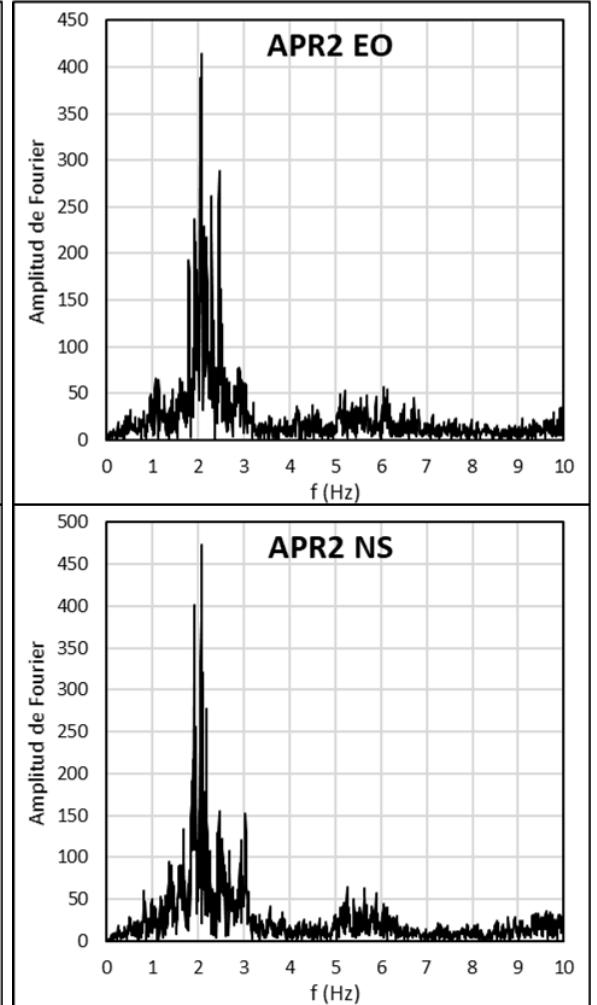
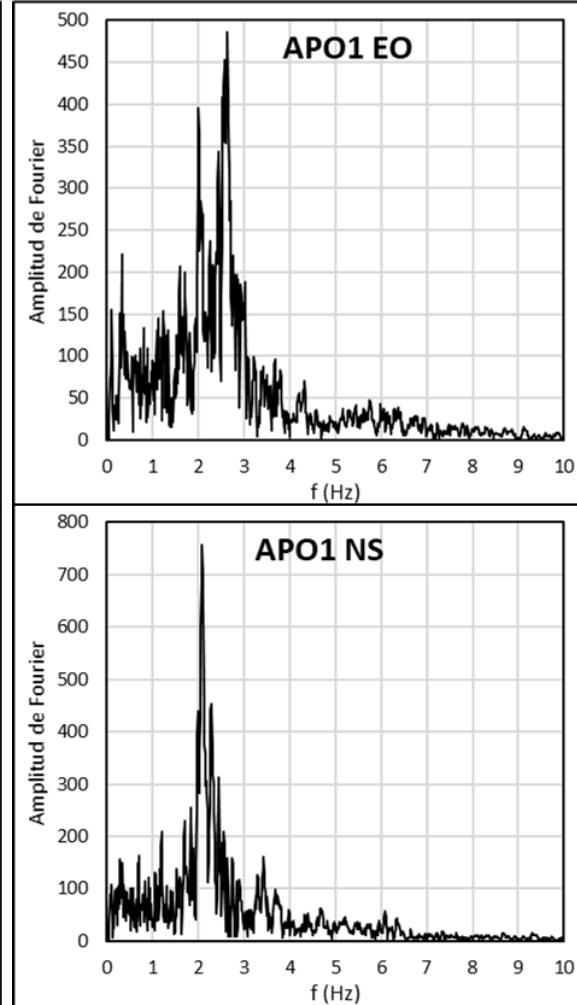
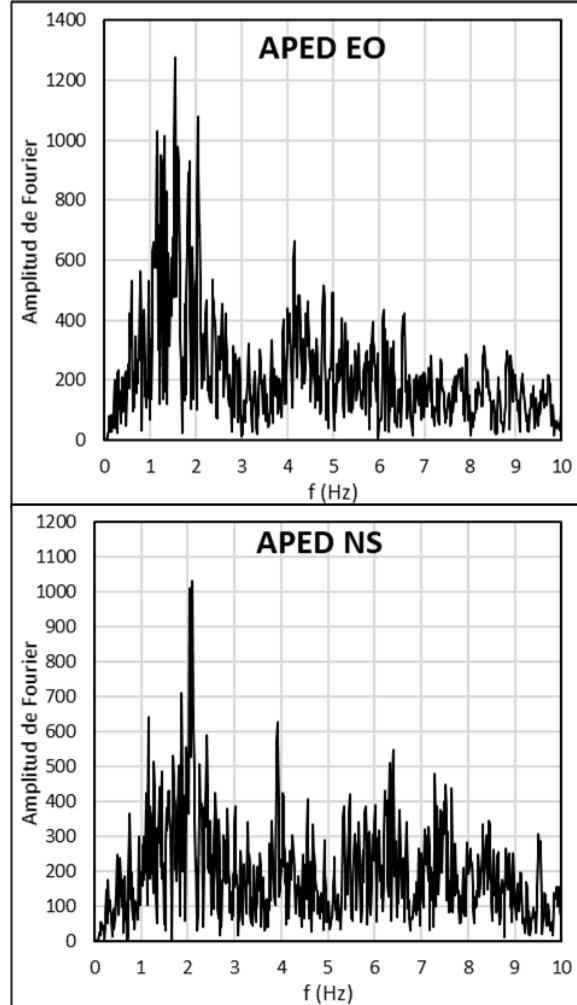


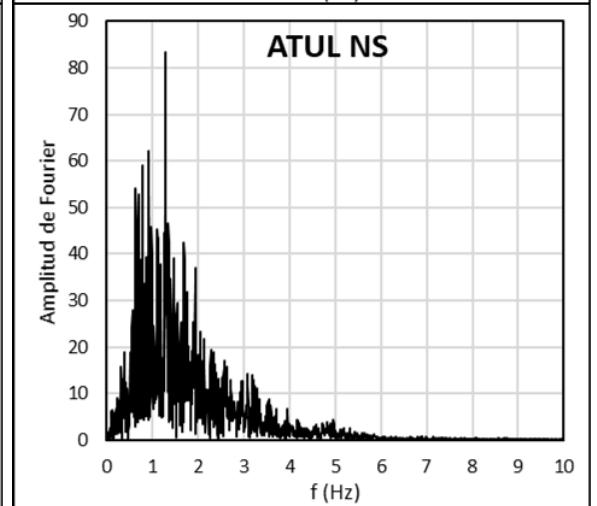
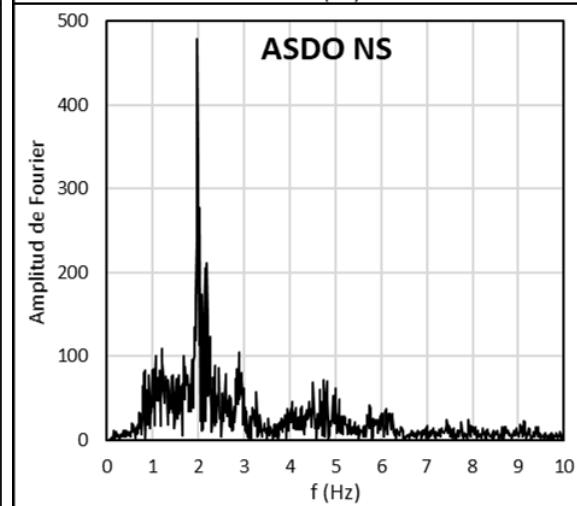
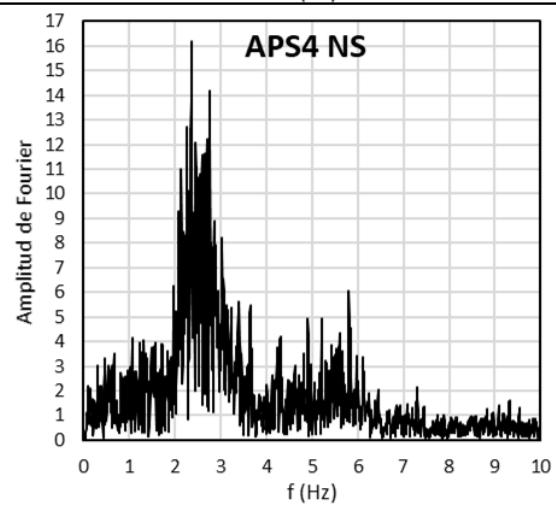
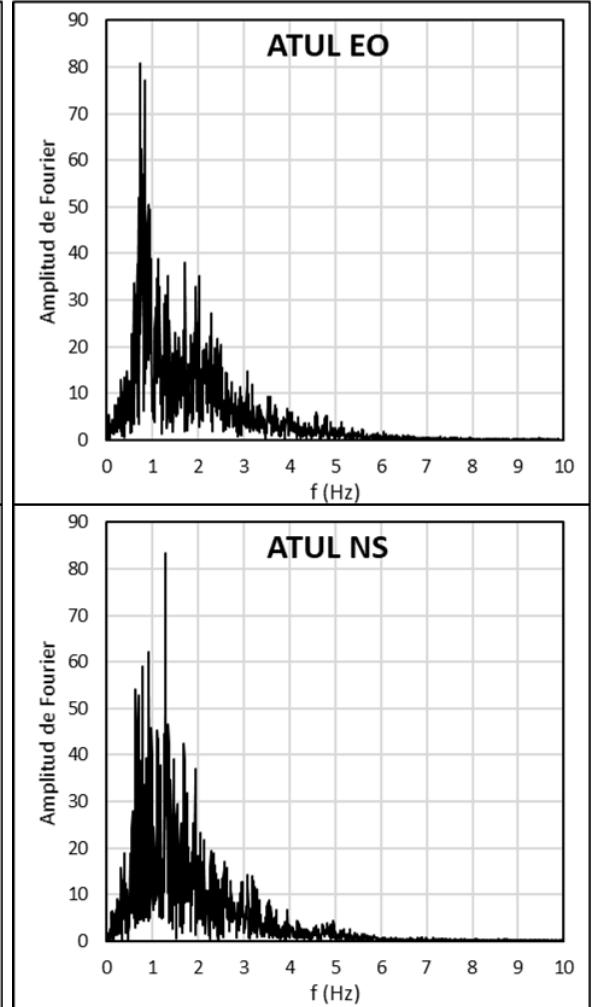
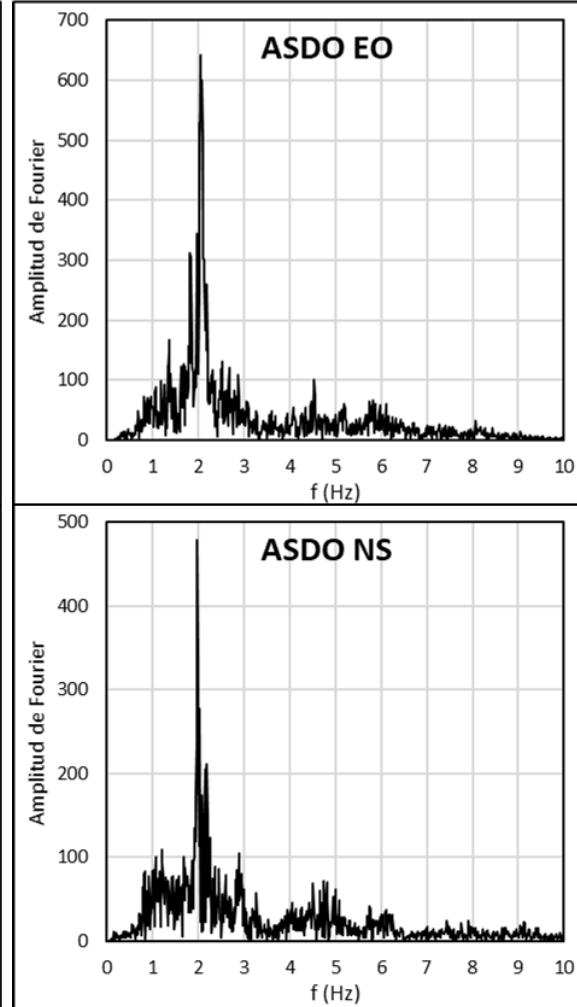
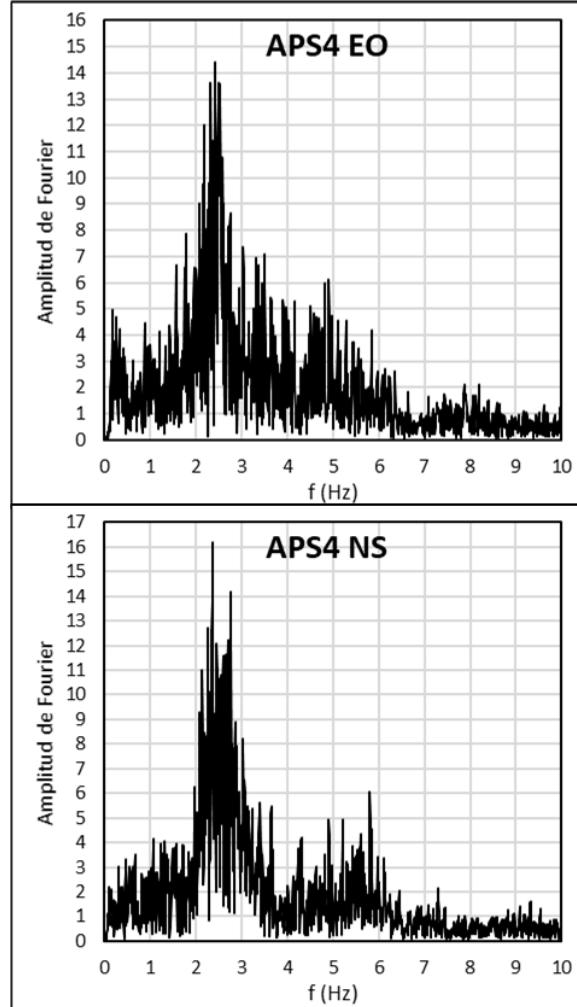


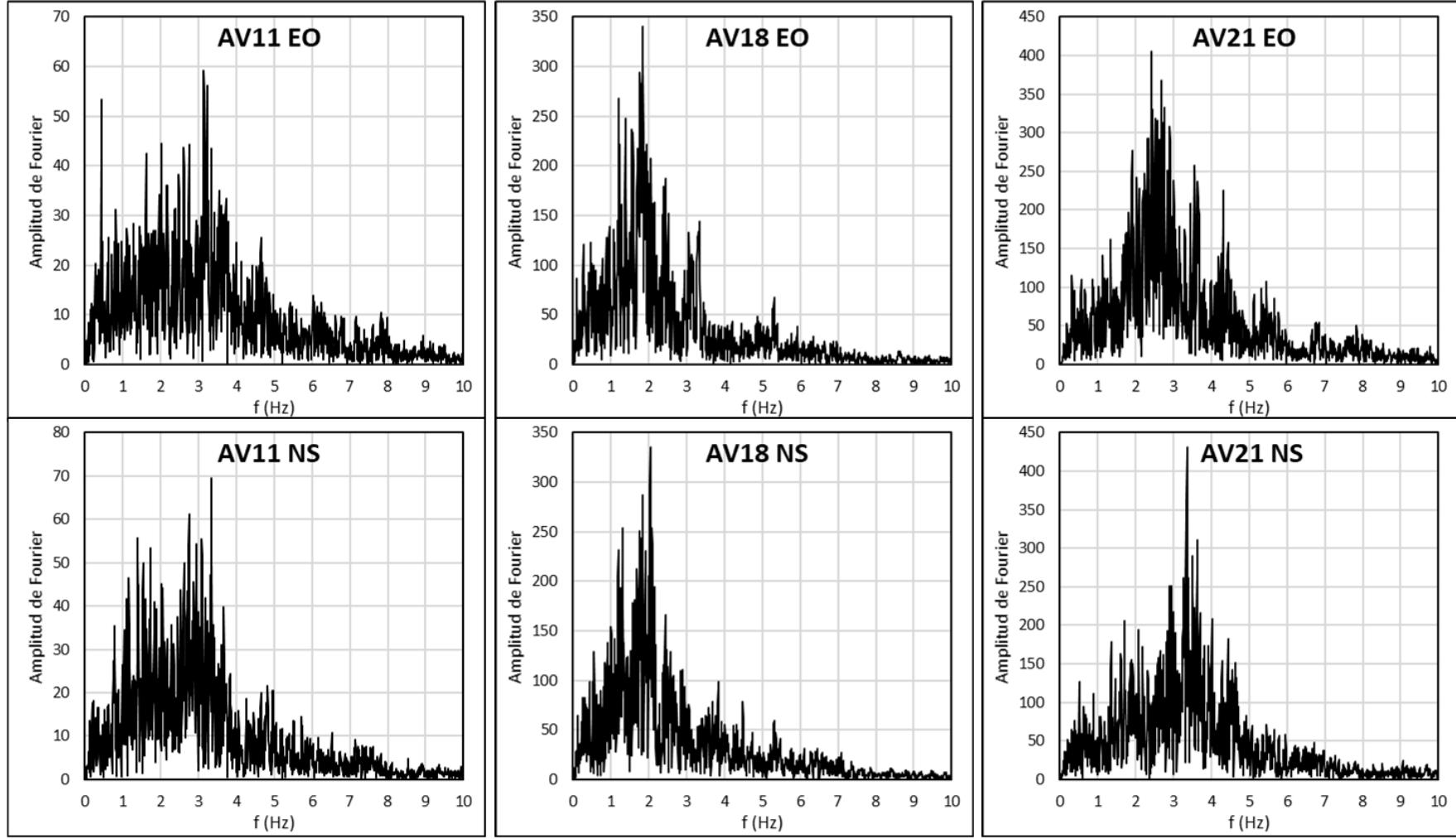


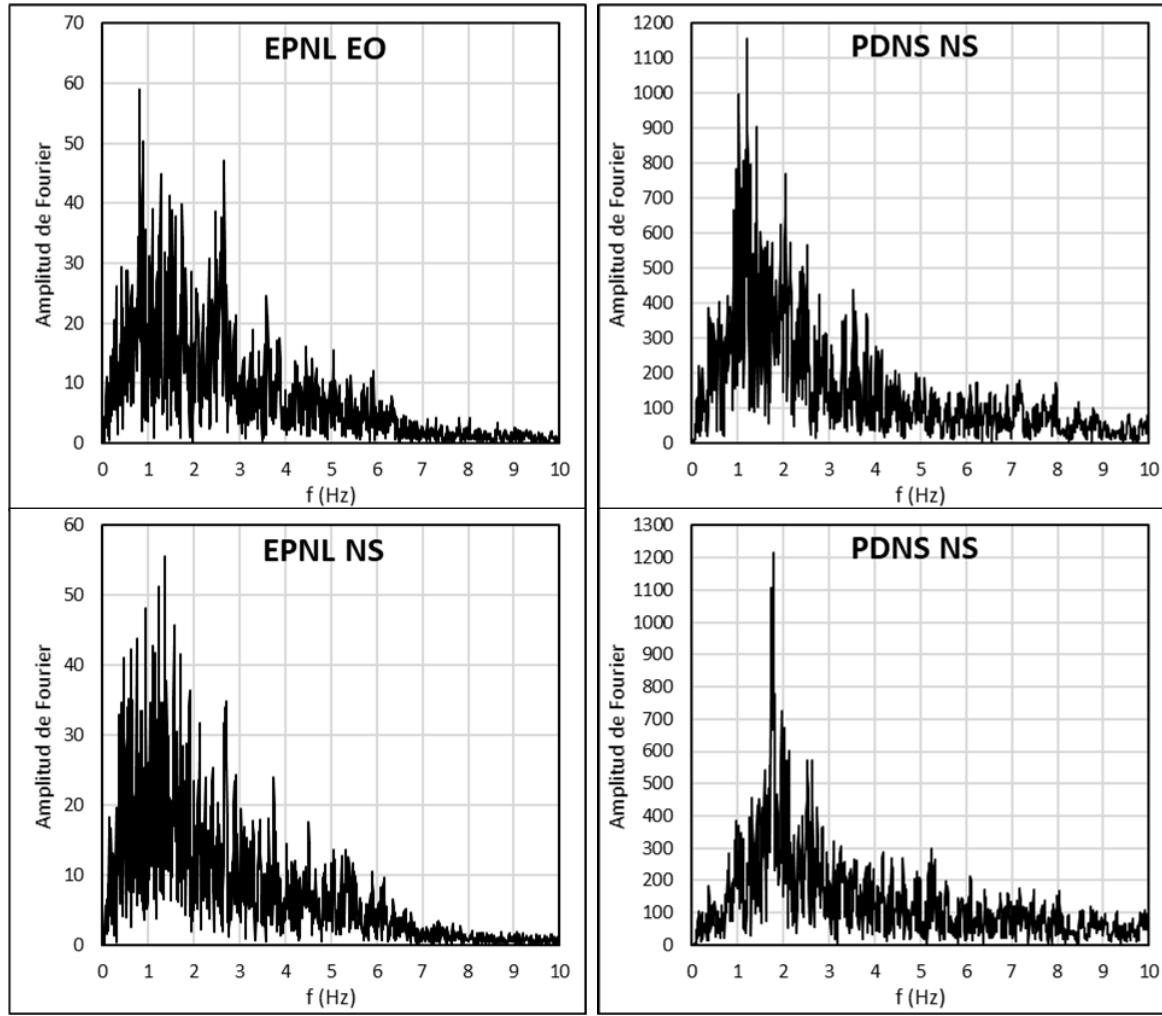






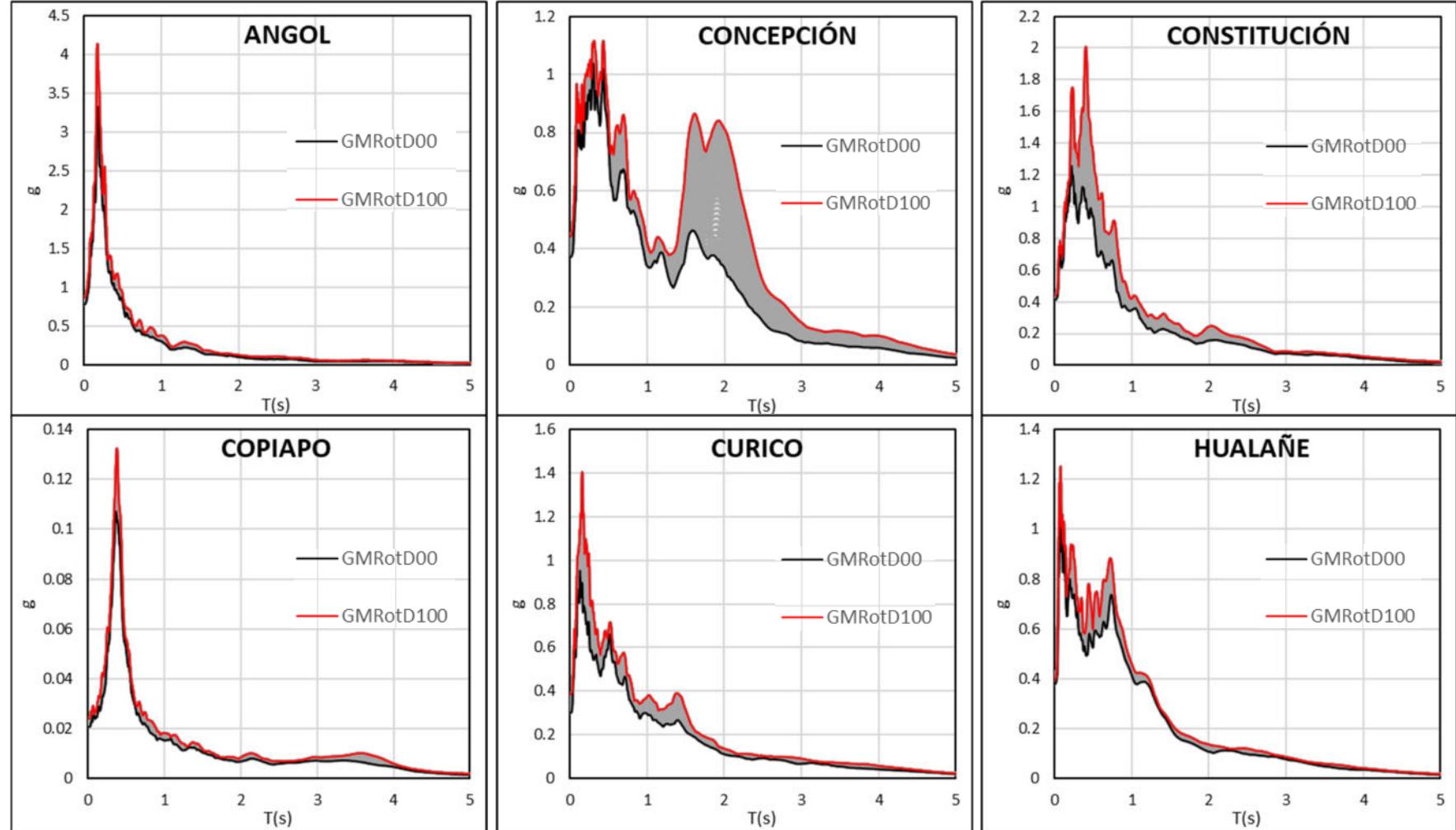


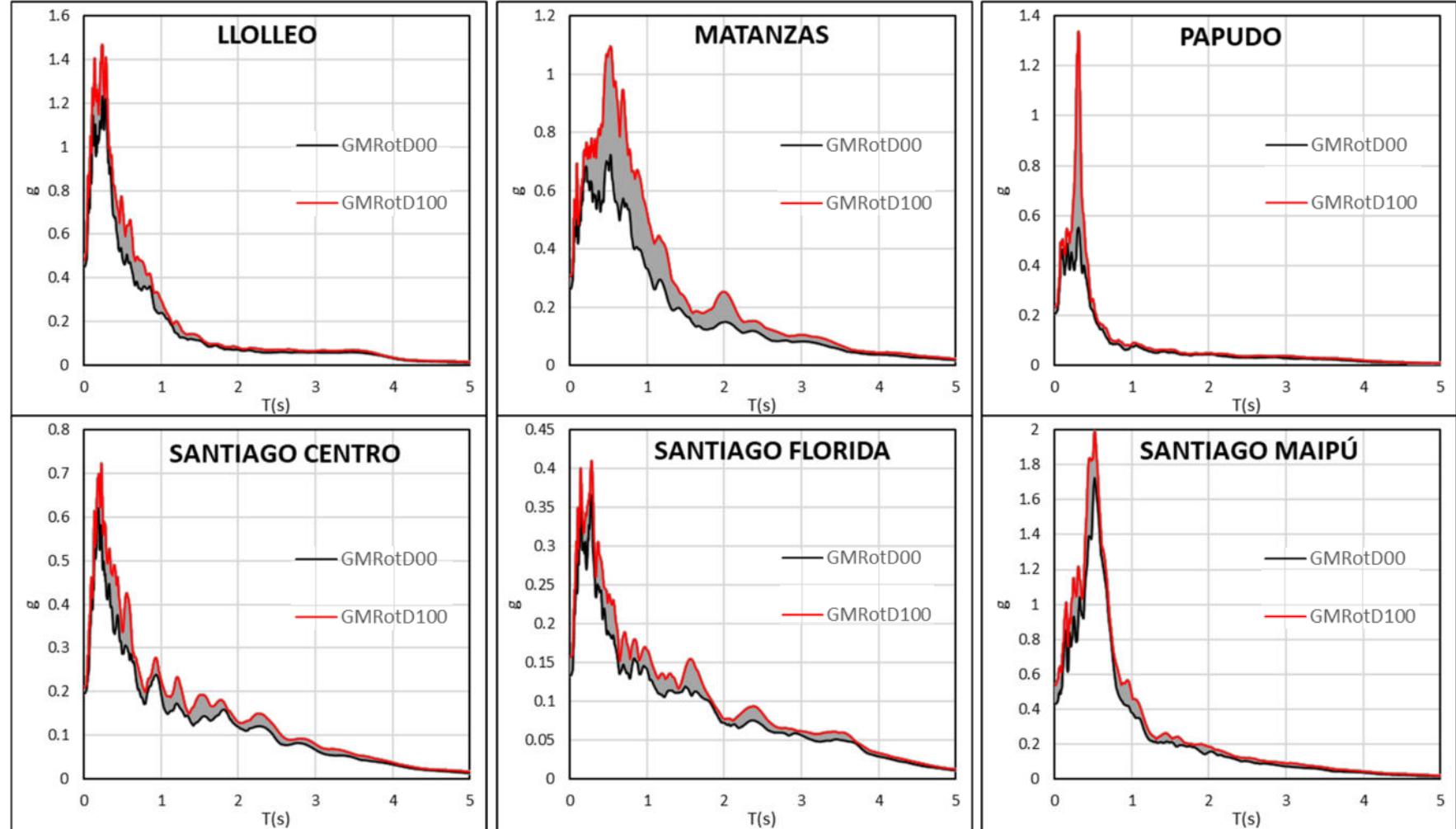


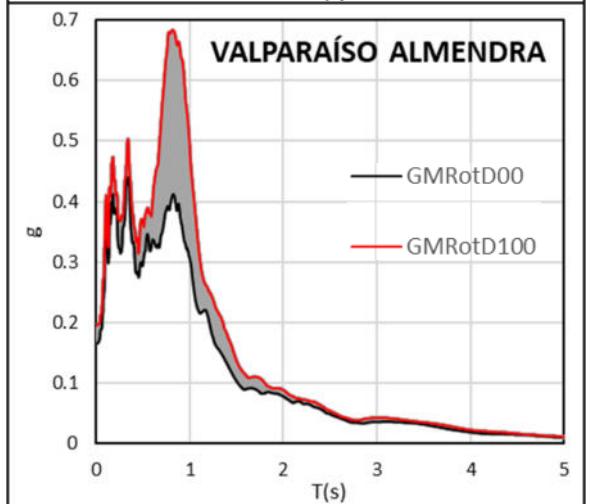
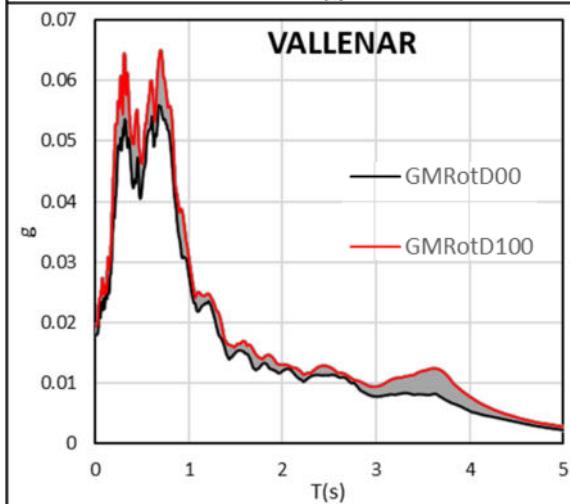
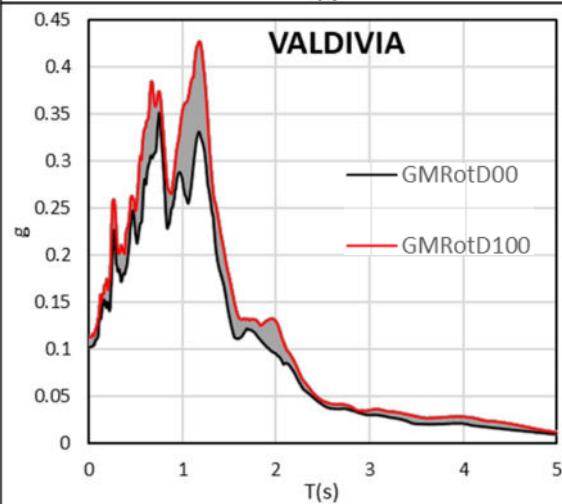
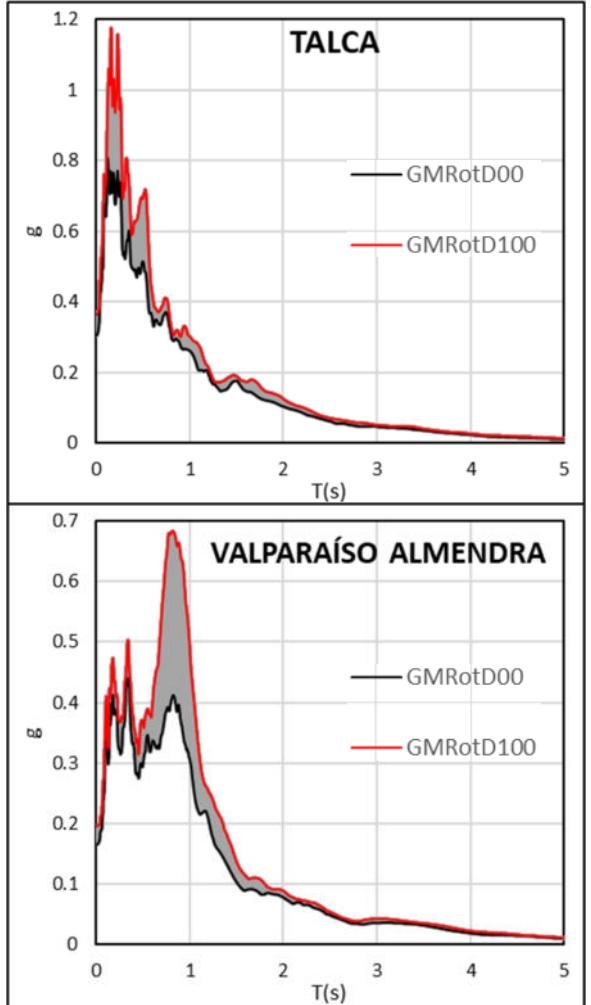
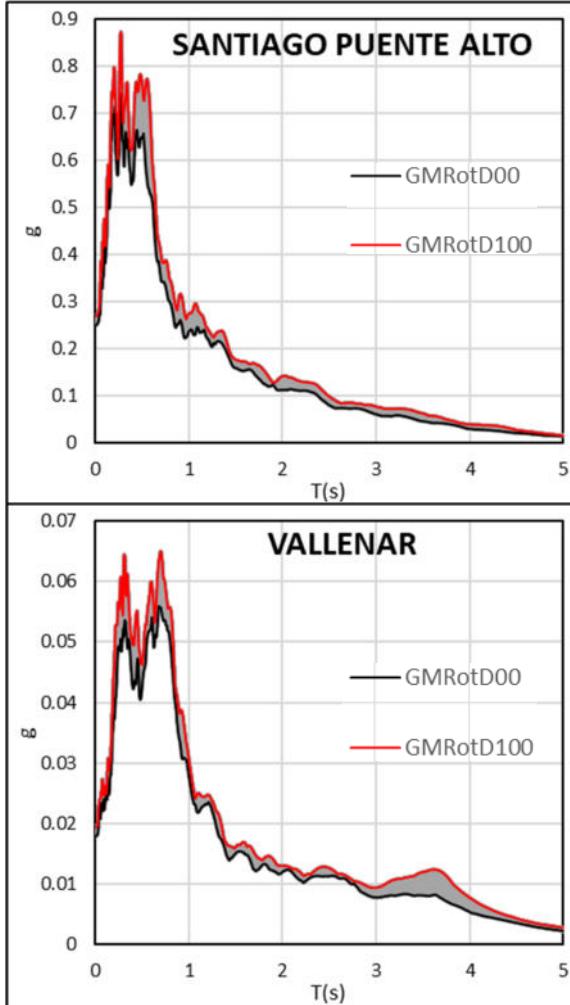
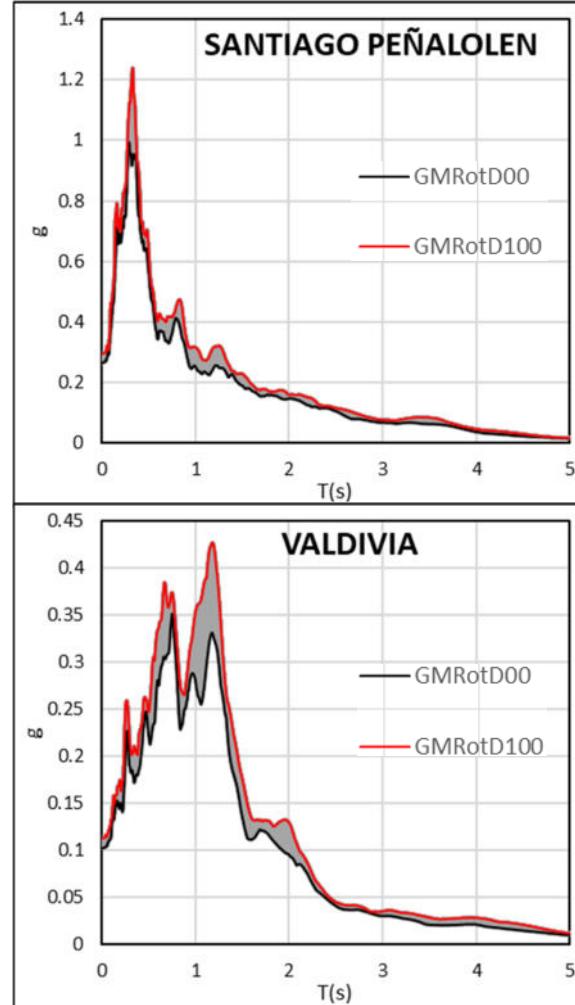


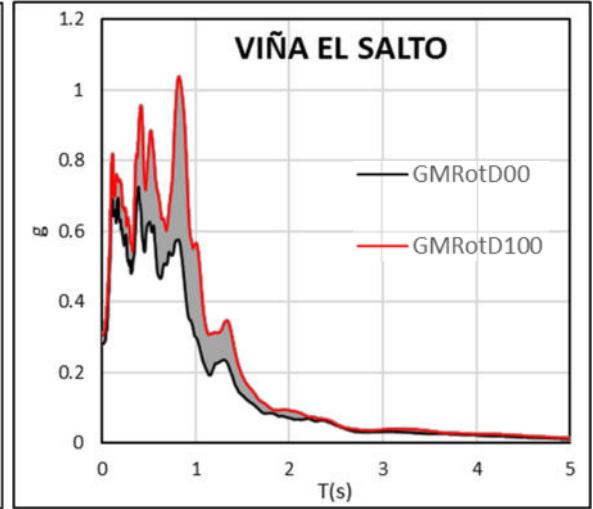
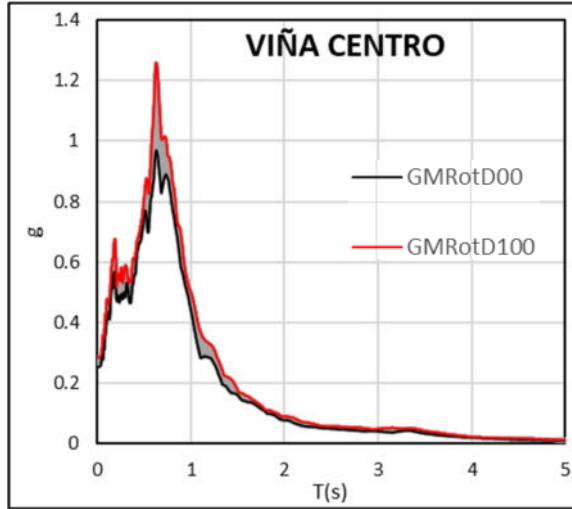
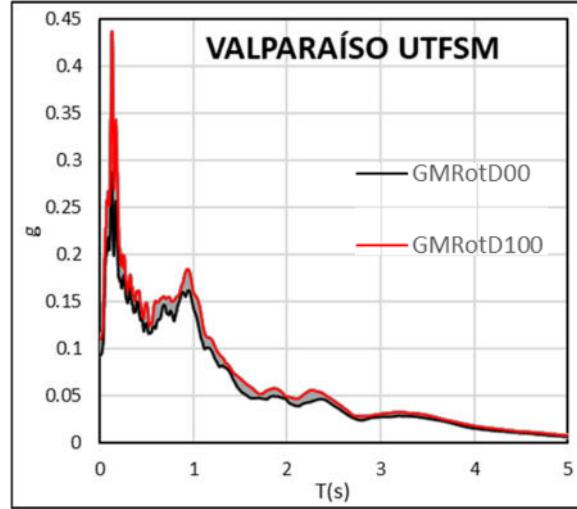
7.2. Chile-Maule 2010

7.2.1. GM ($\theta_i = 0^\circ$: $\Delta\theta = 1^\circ$: $\theta_f = 90^\circ$)

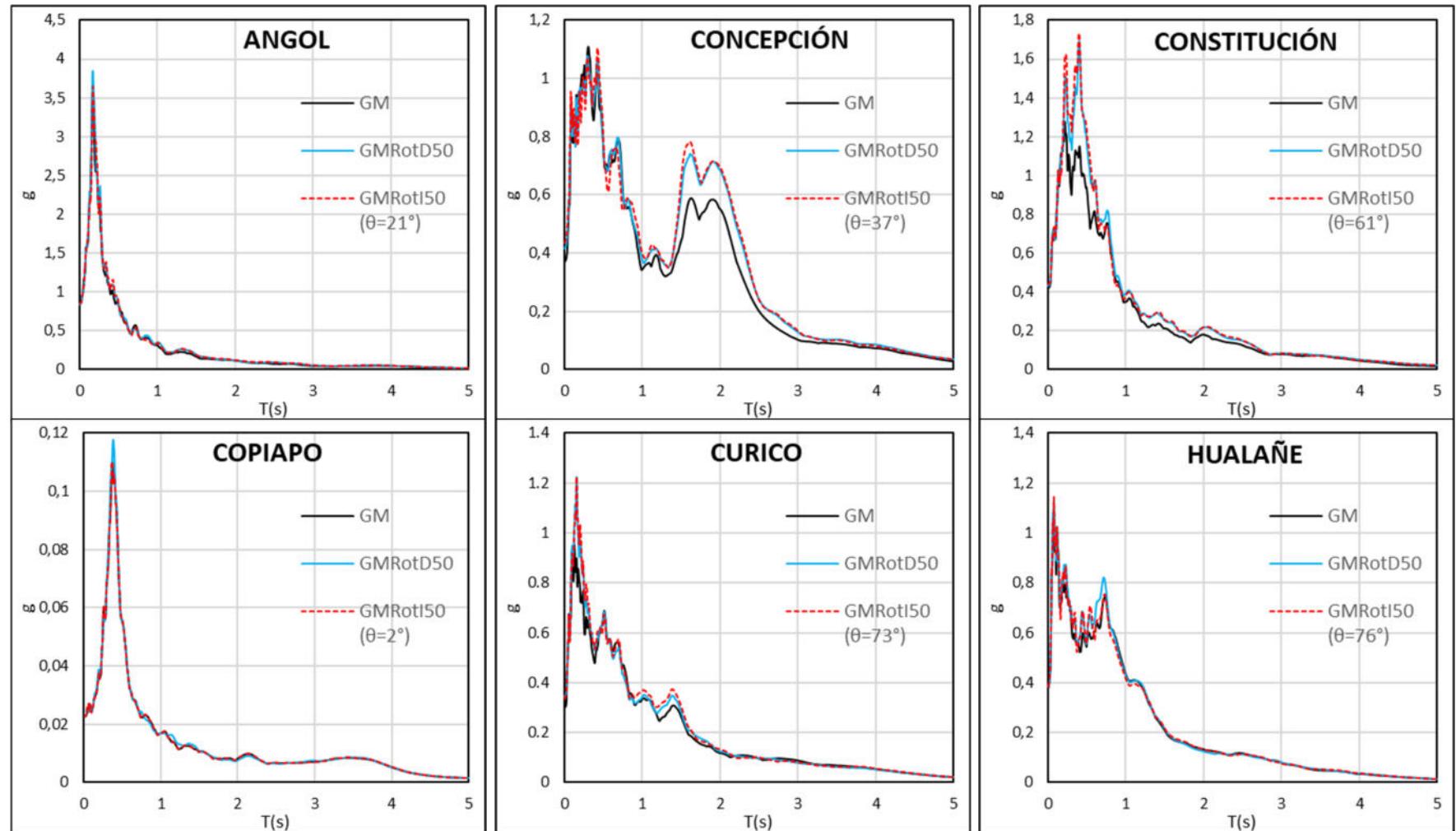


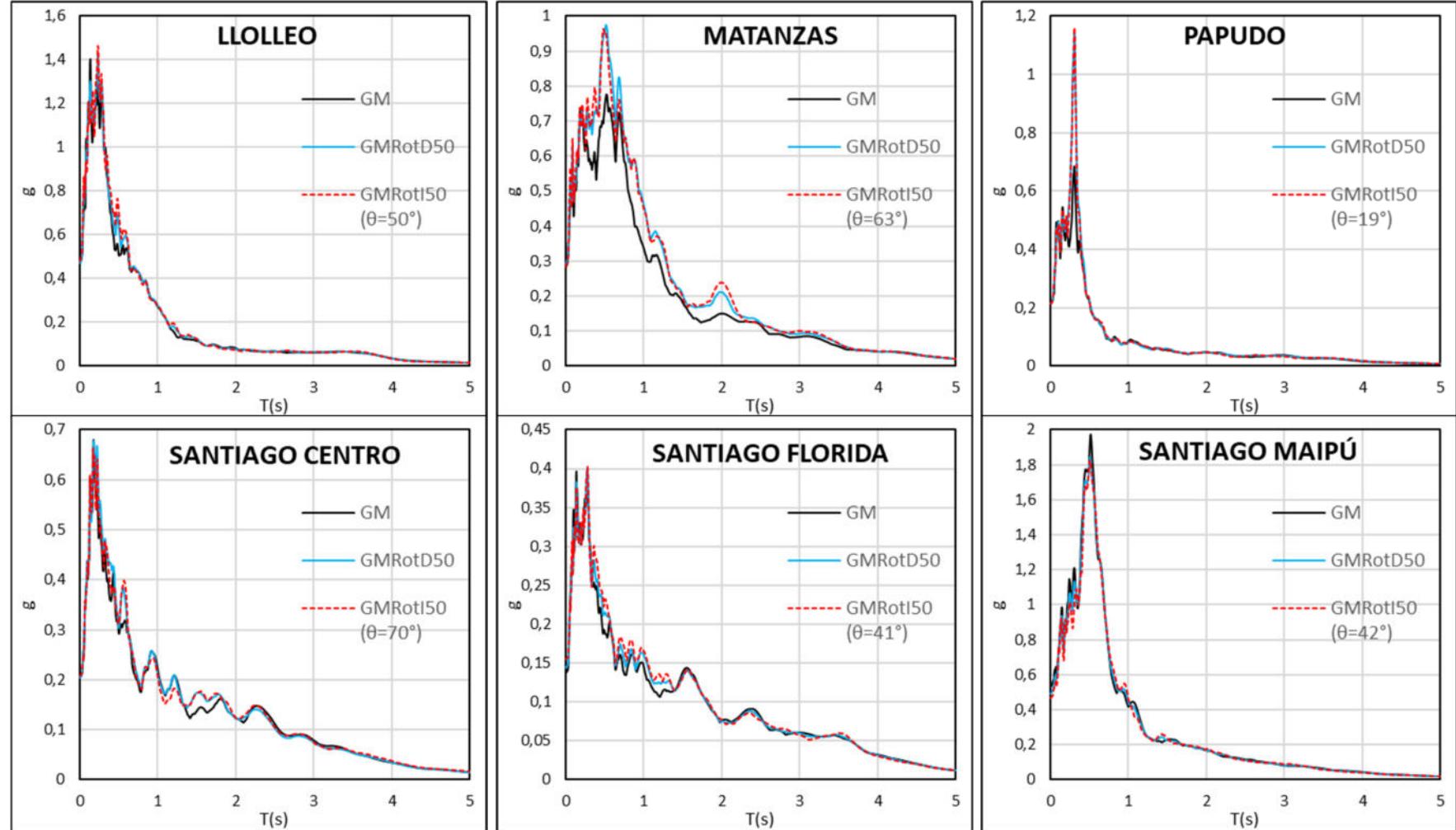


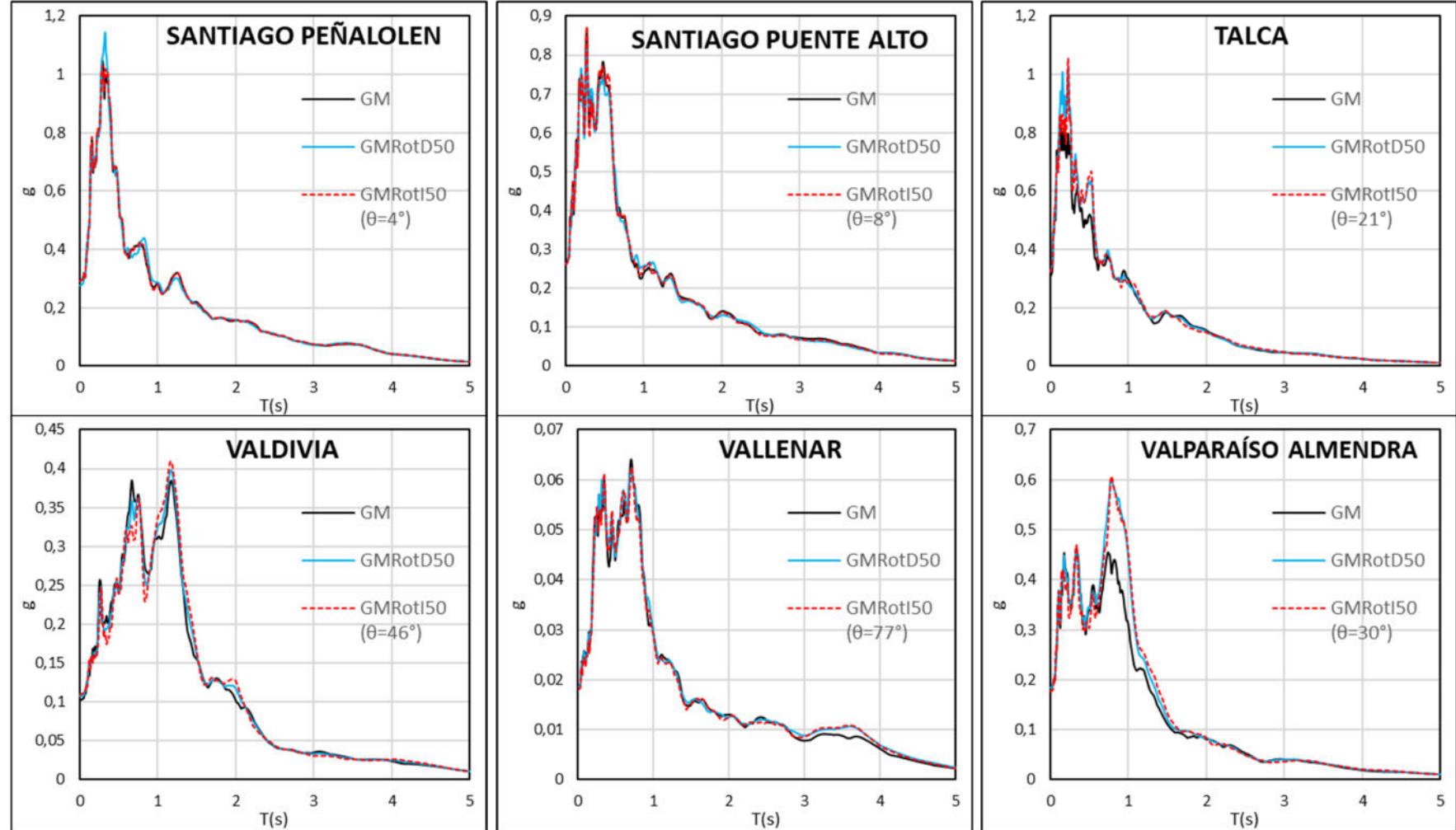


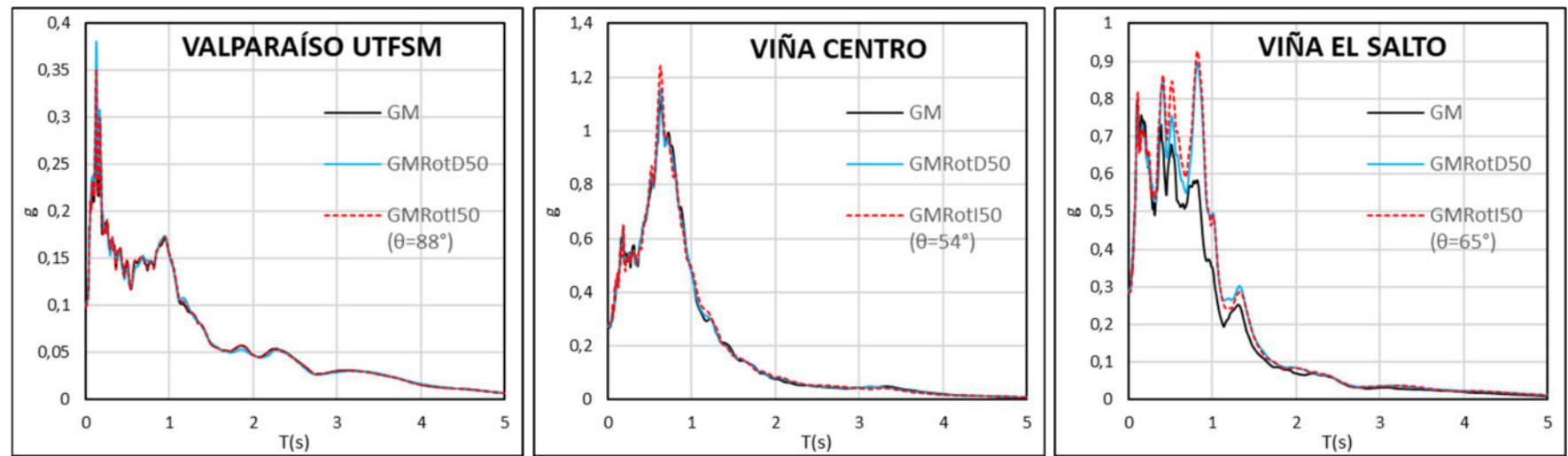


7.2.2. GM, GMRotD50 y GMRotI50

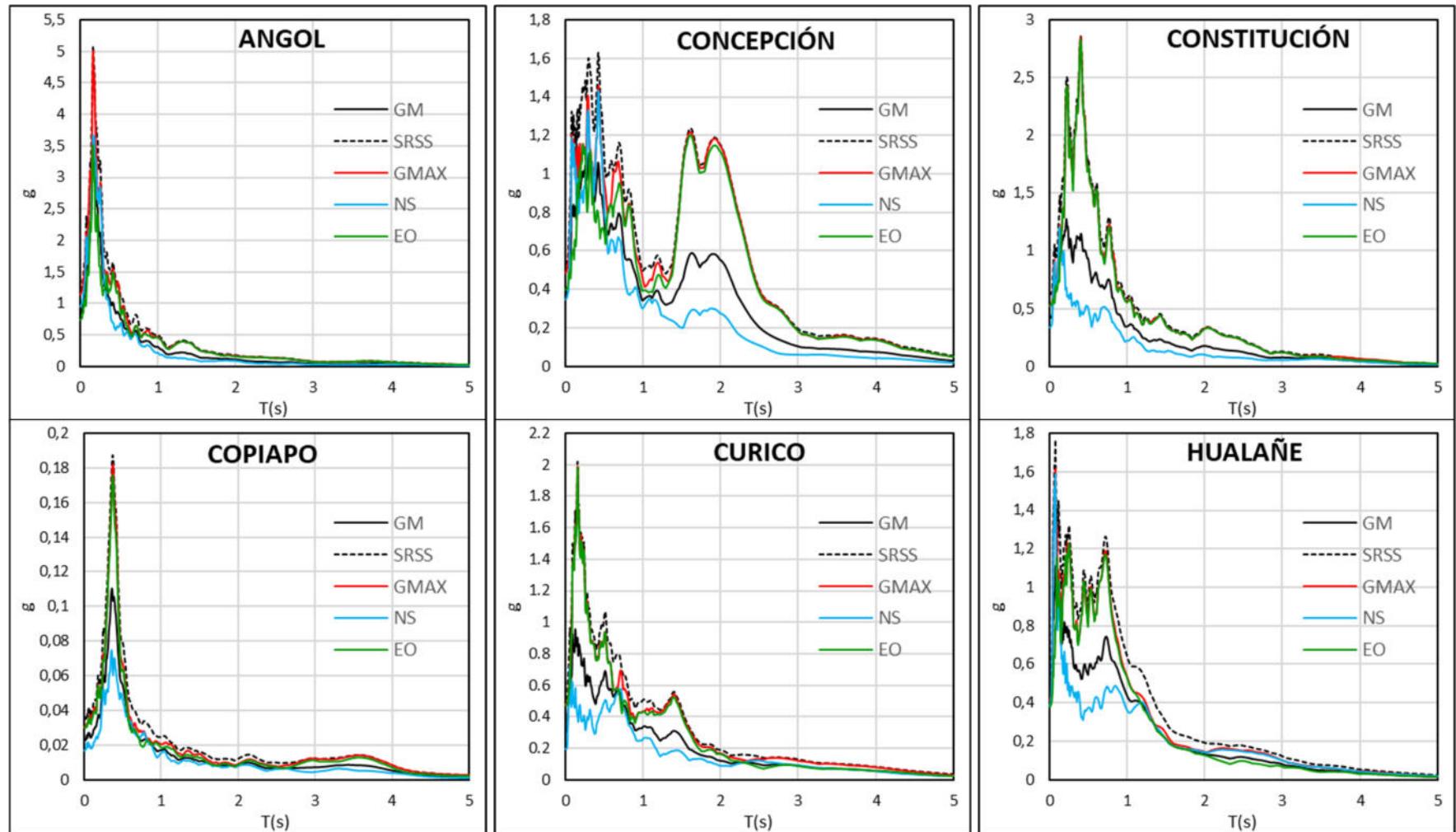


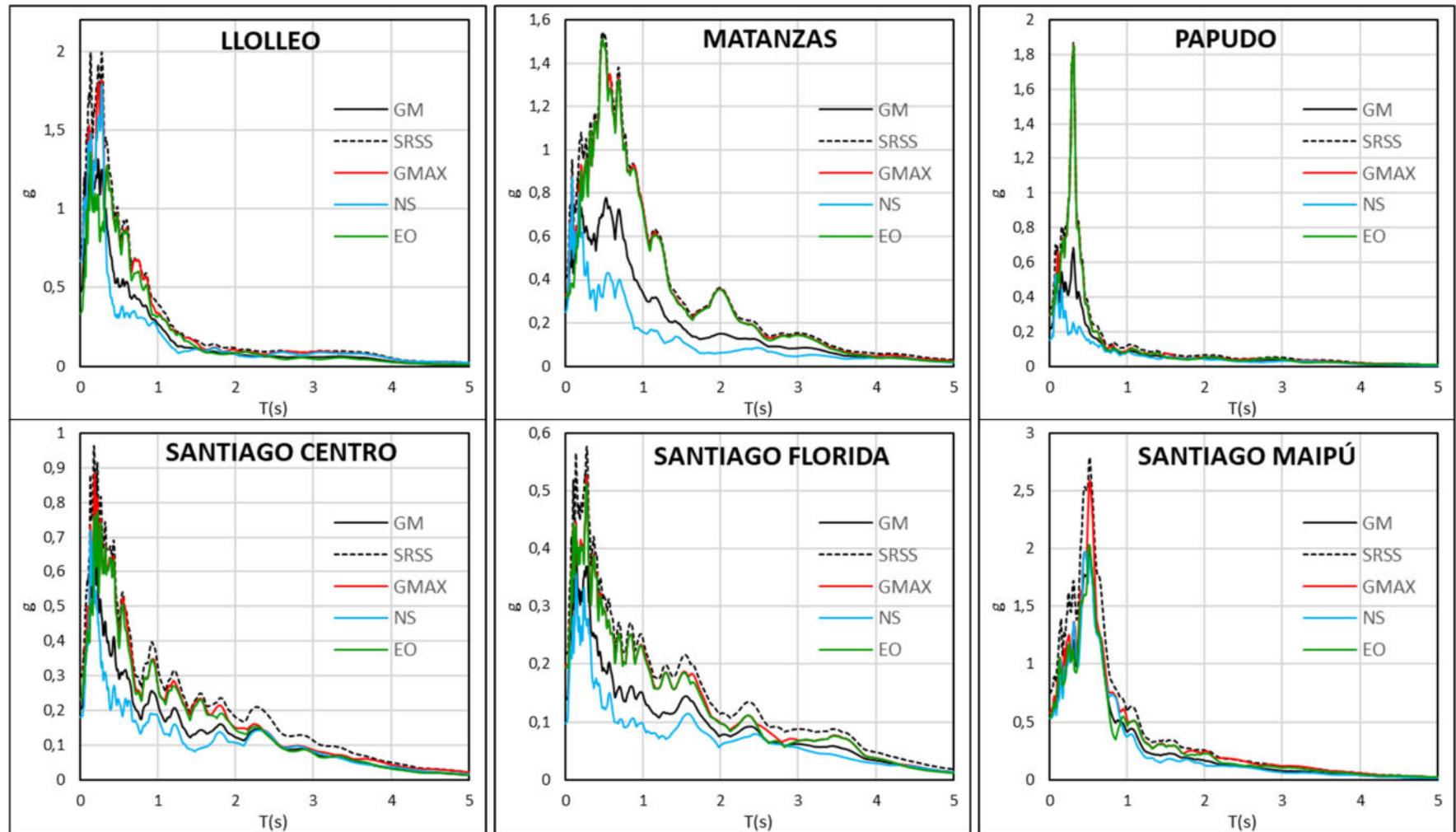


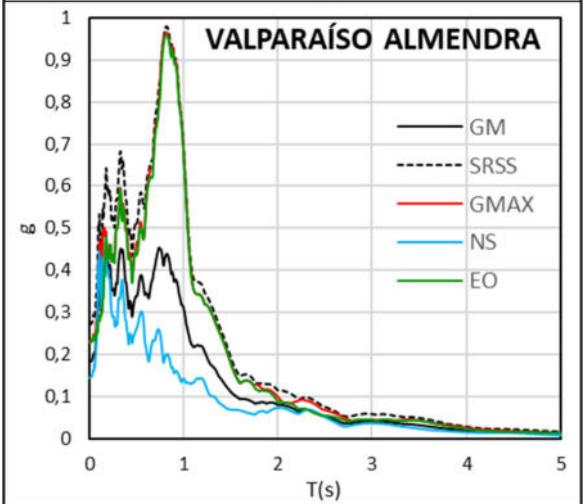
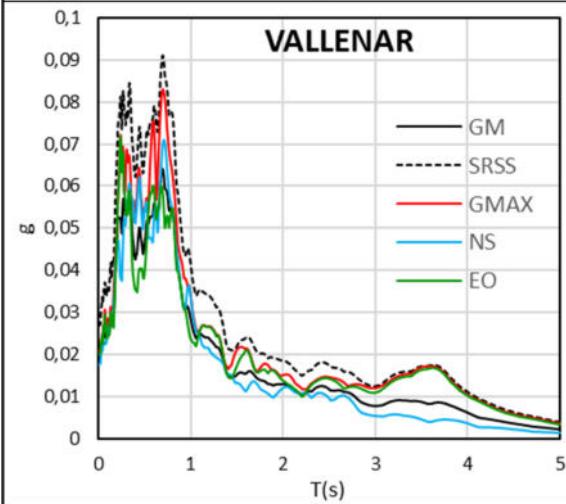
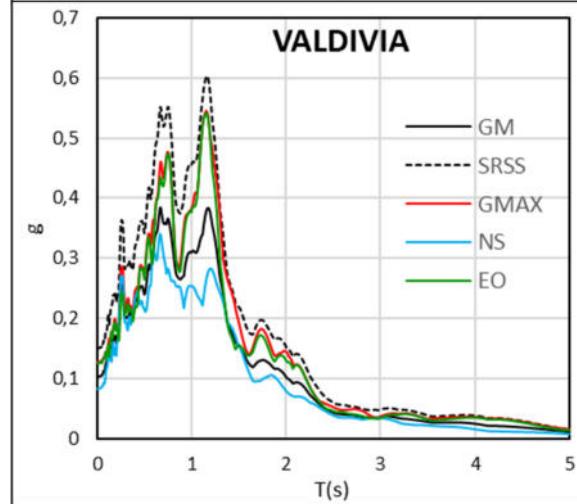
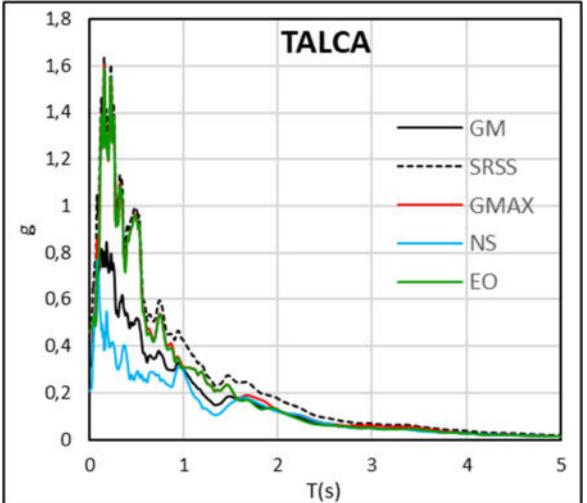
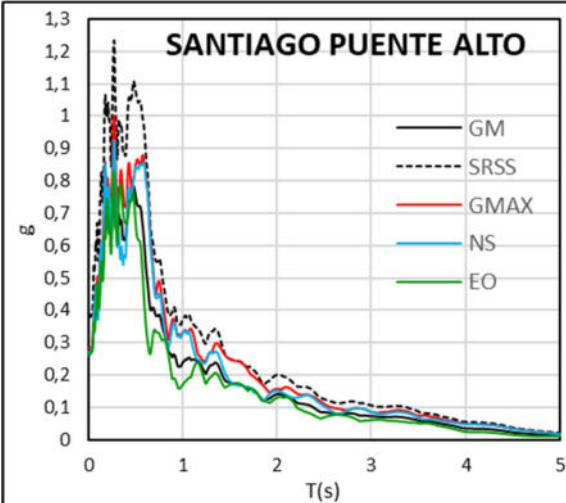
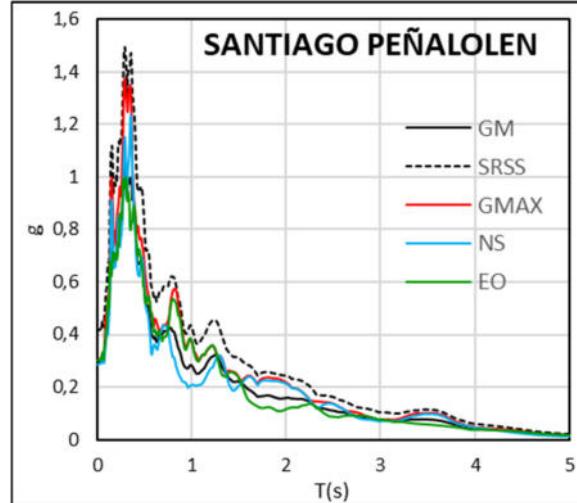


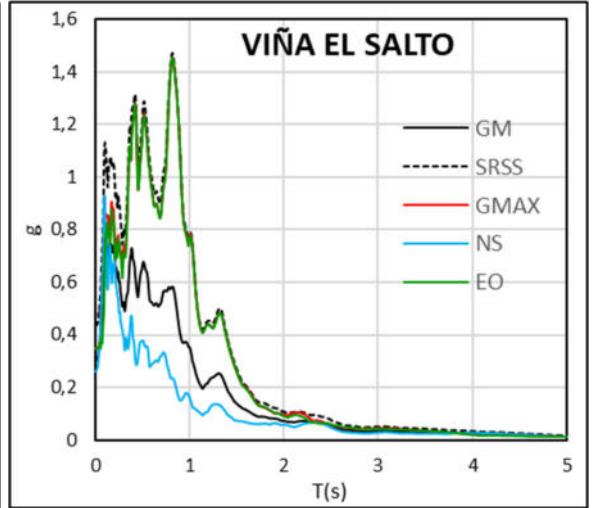
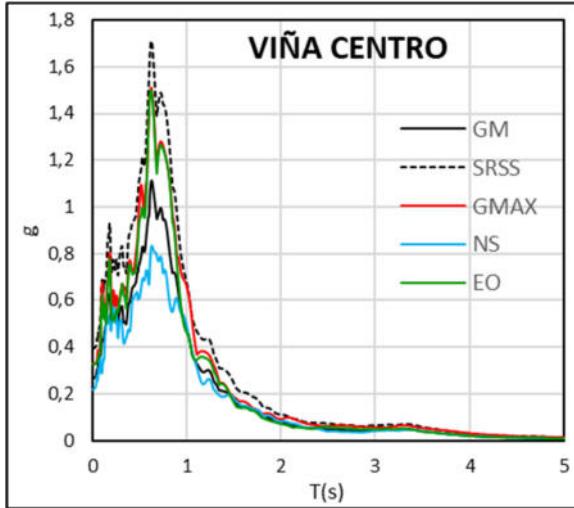
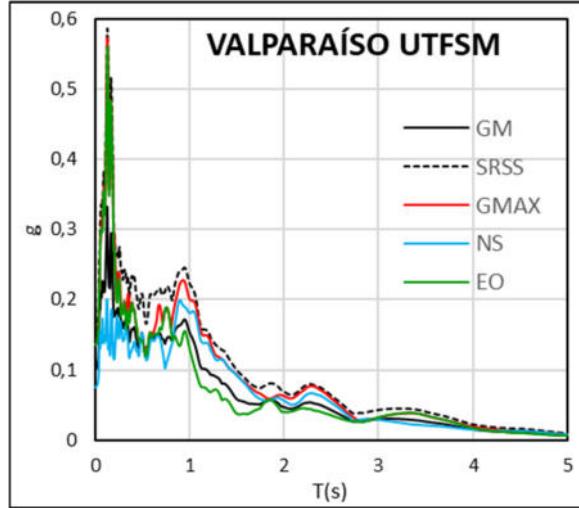


7.2.3. GM, SRSS, GMax, EO y NS

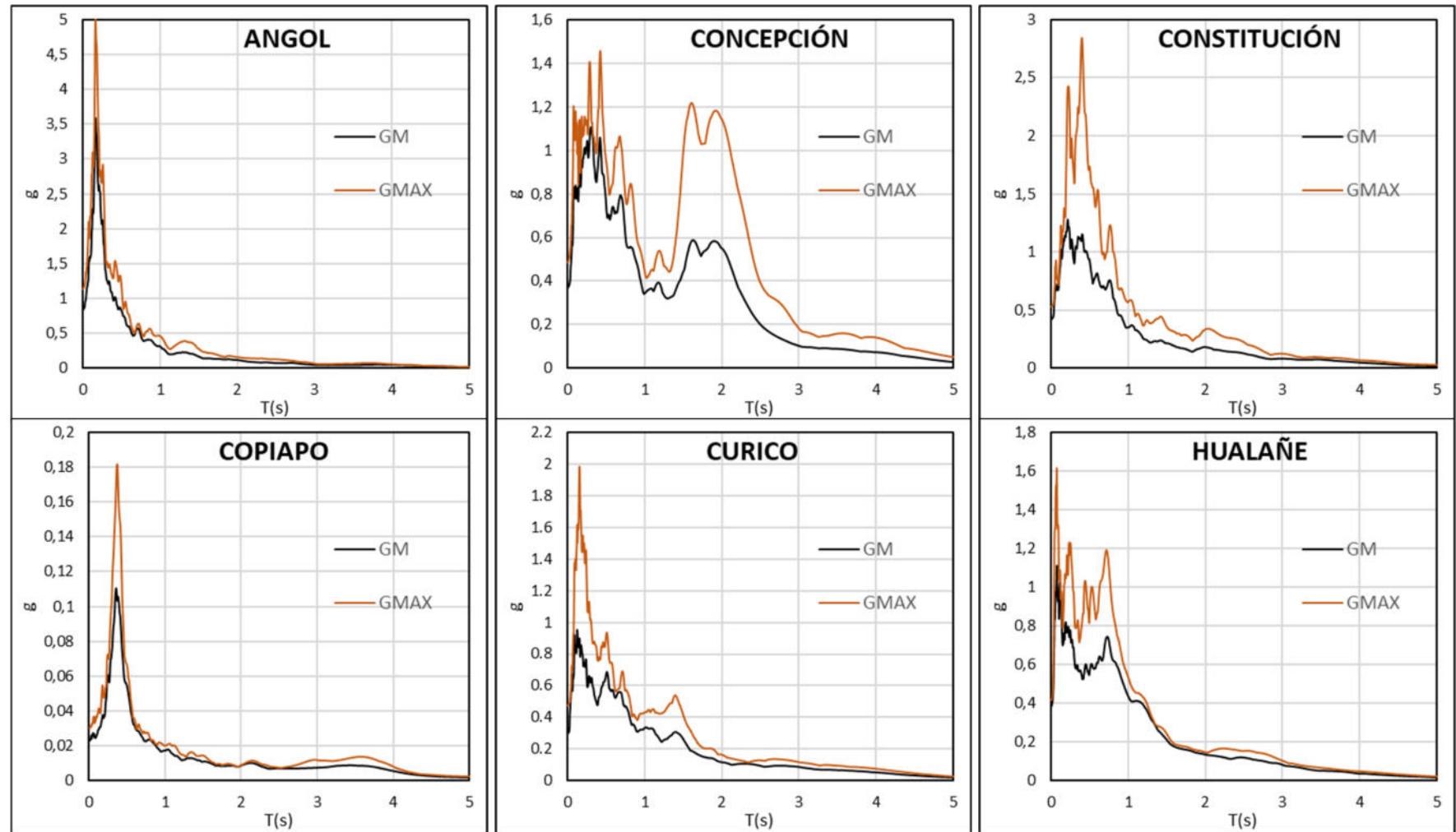


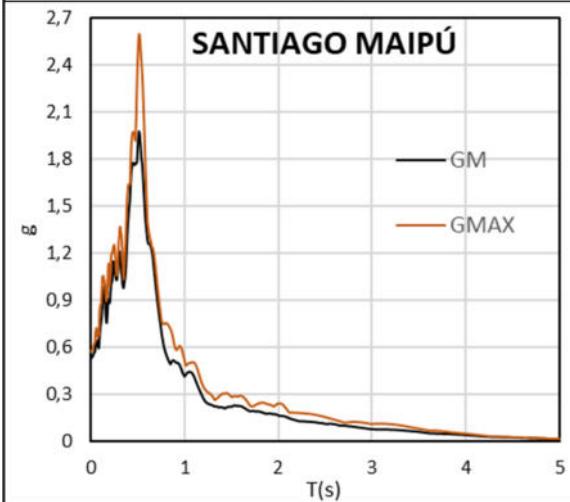
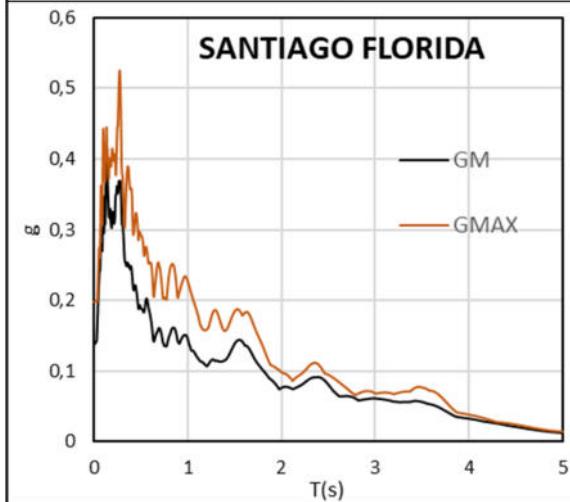
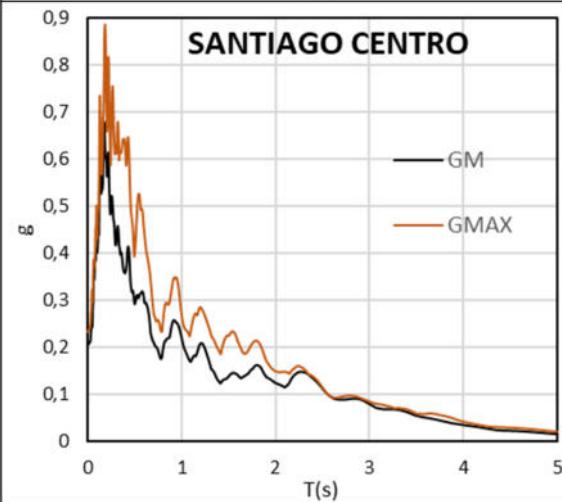
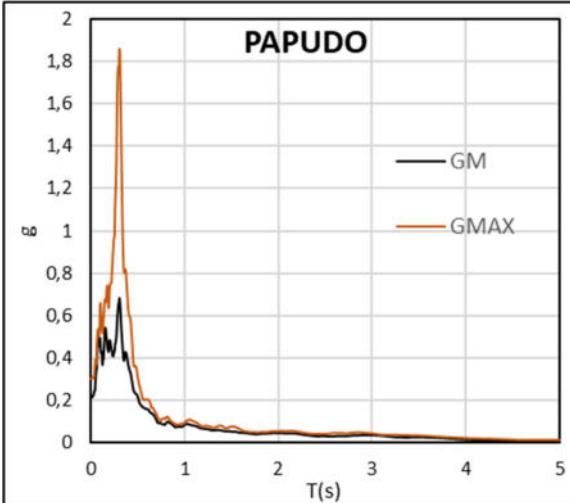
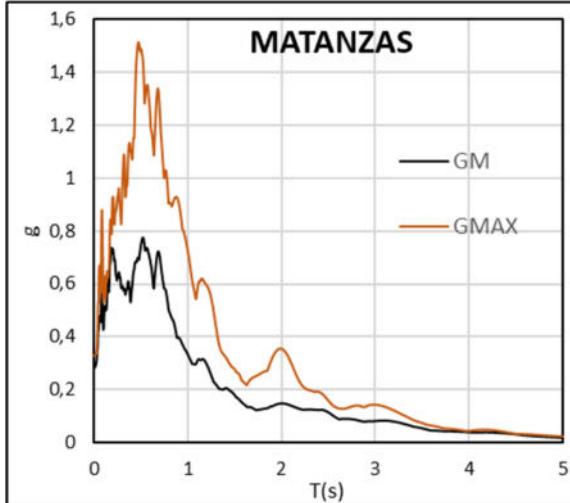
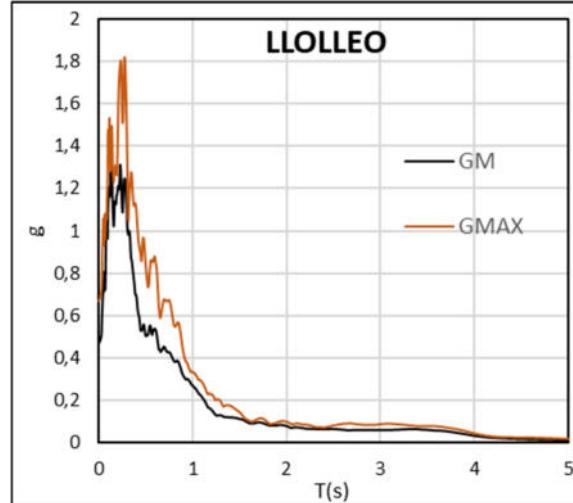


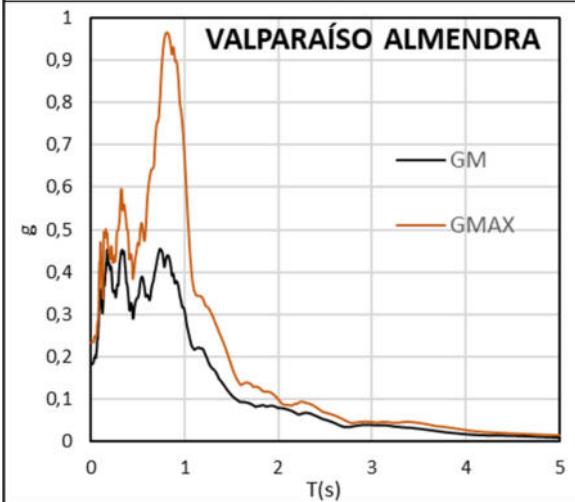
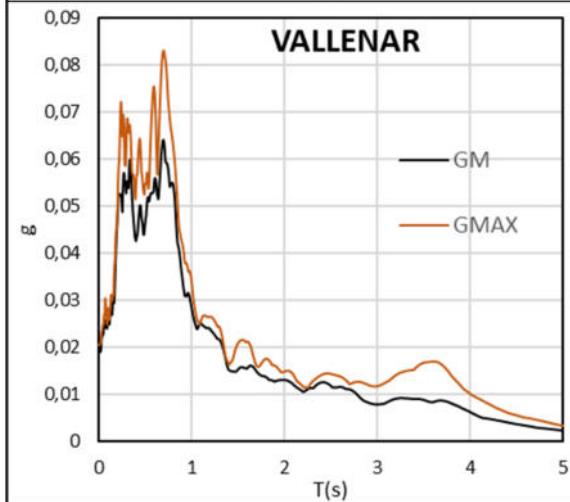
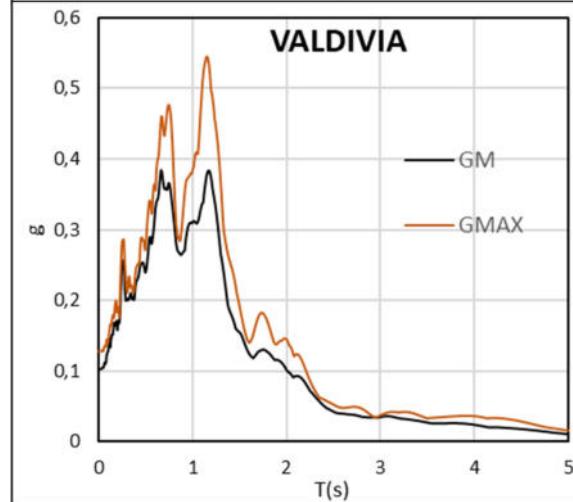
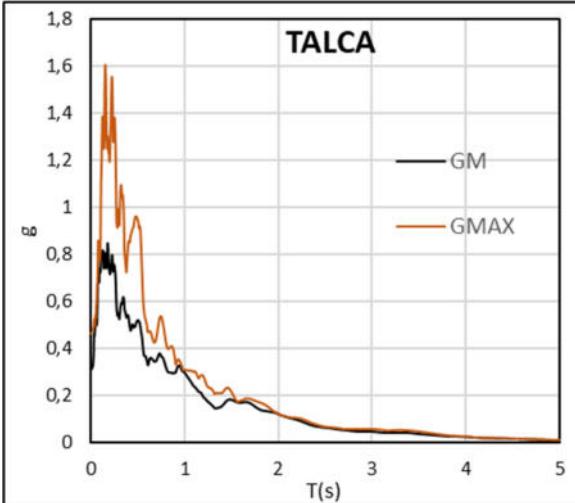
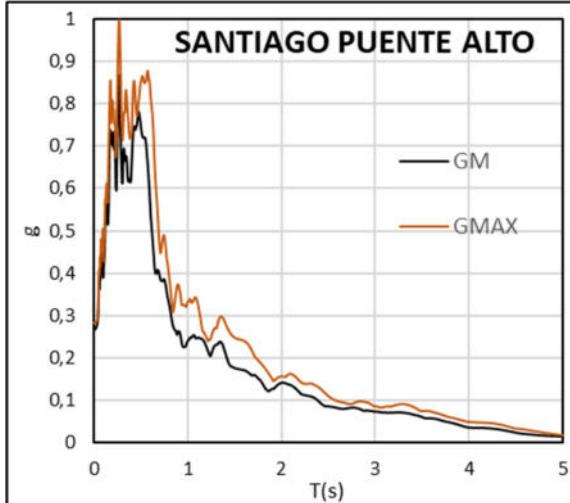
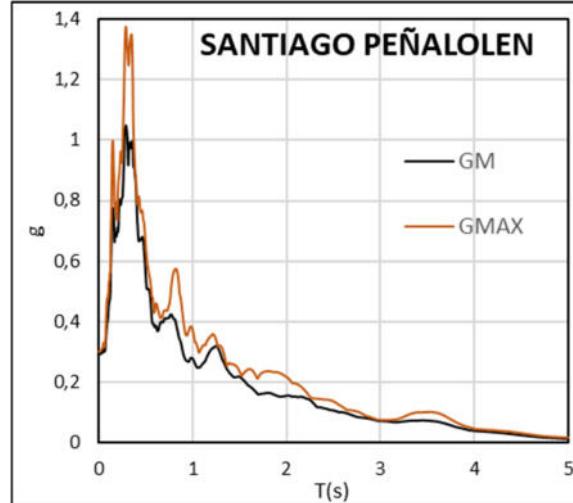


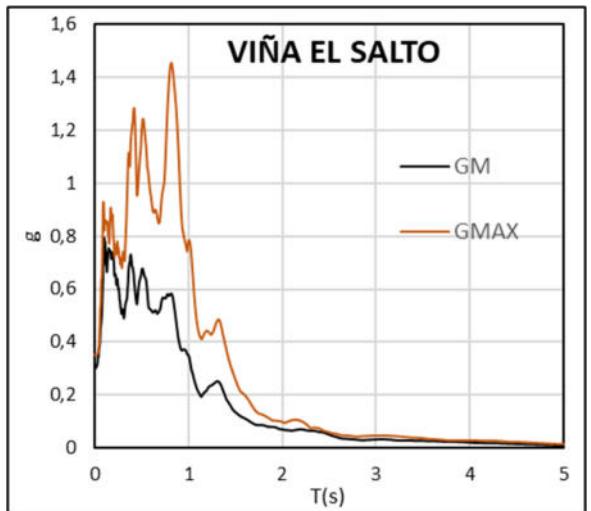
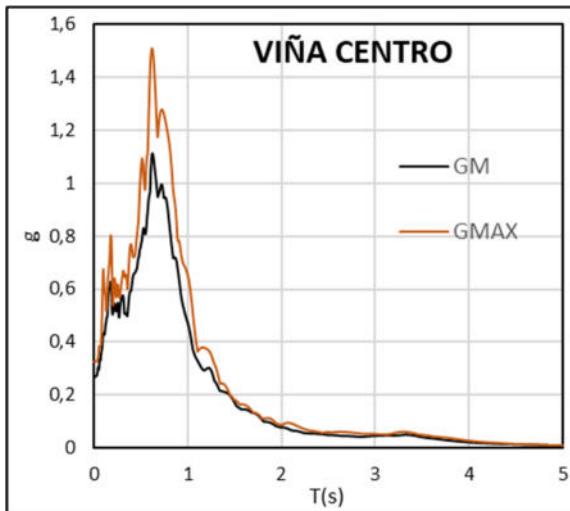
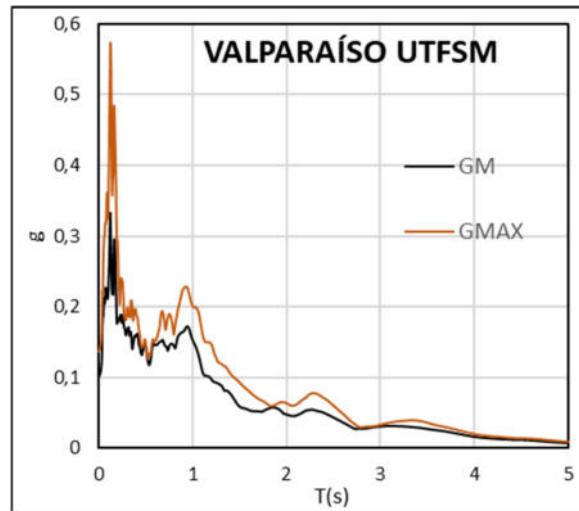


7.2.4. GM vs GMax

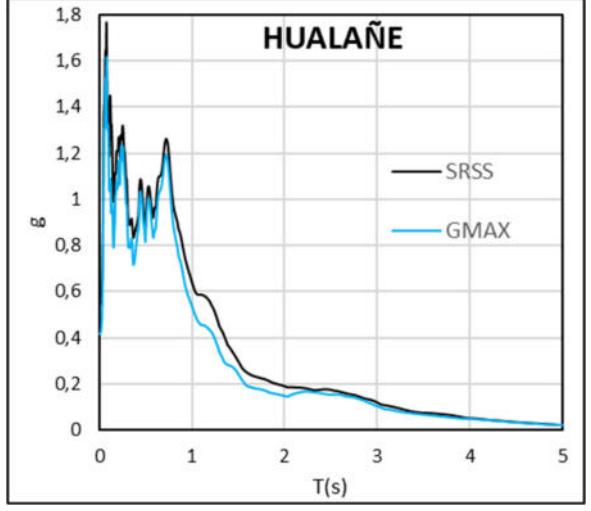
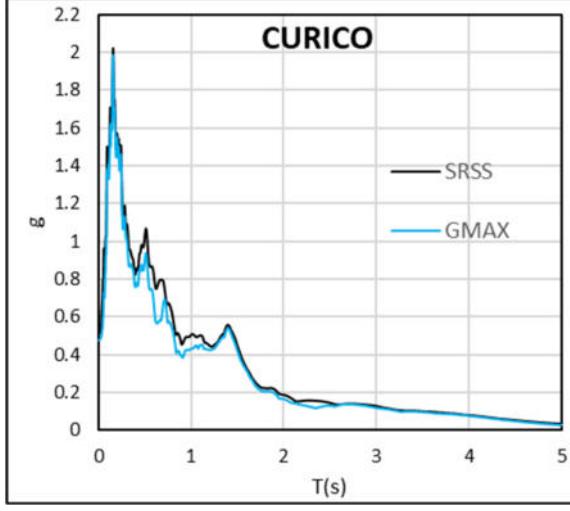
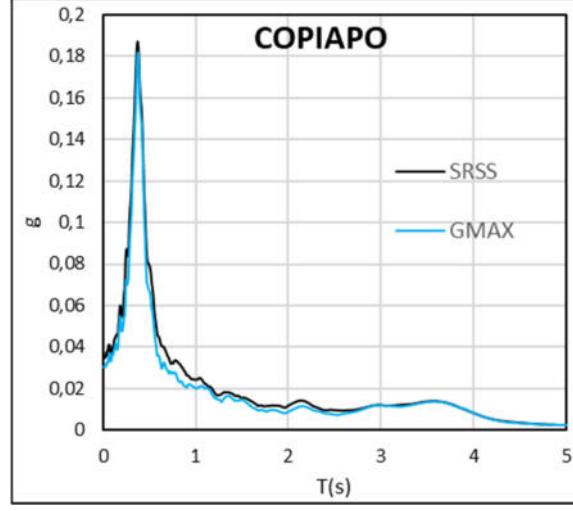
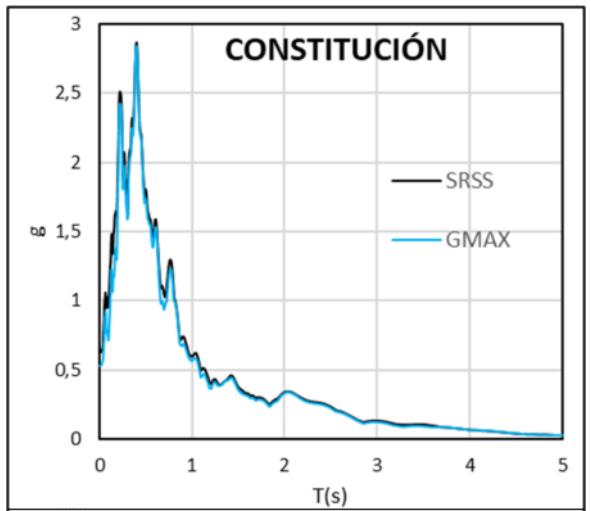
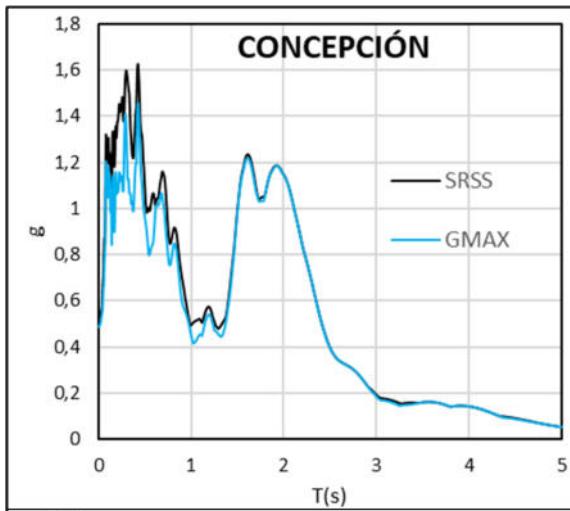
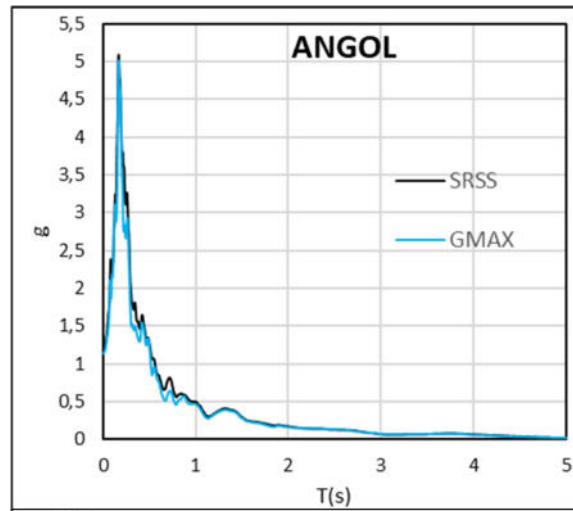


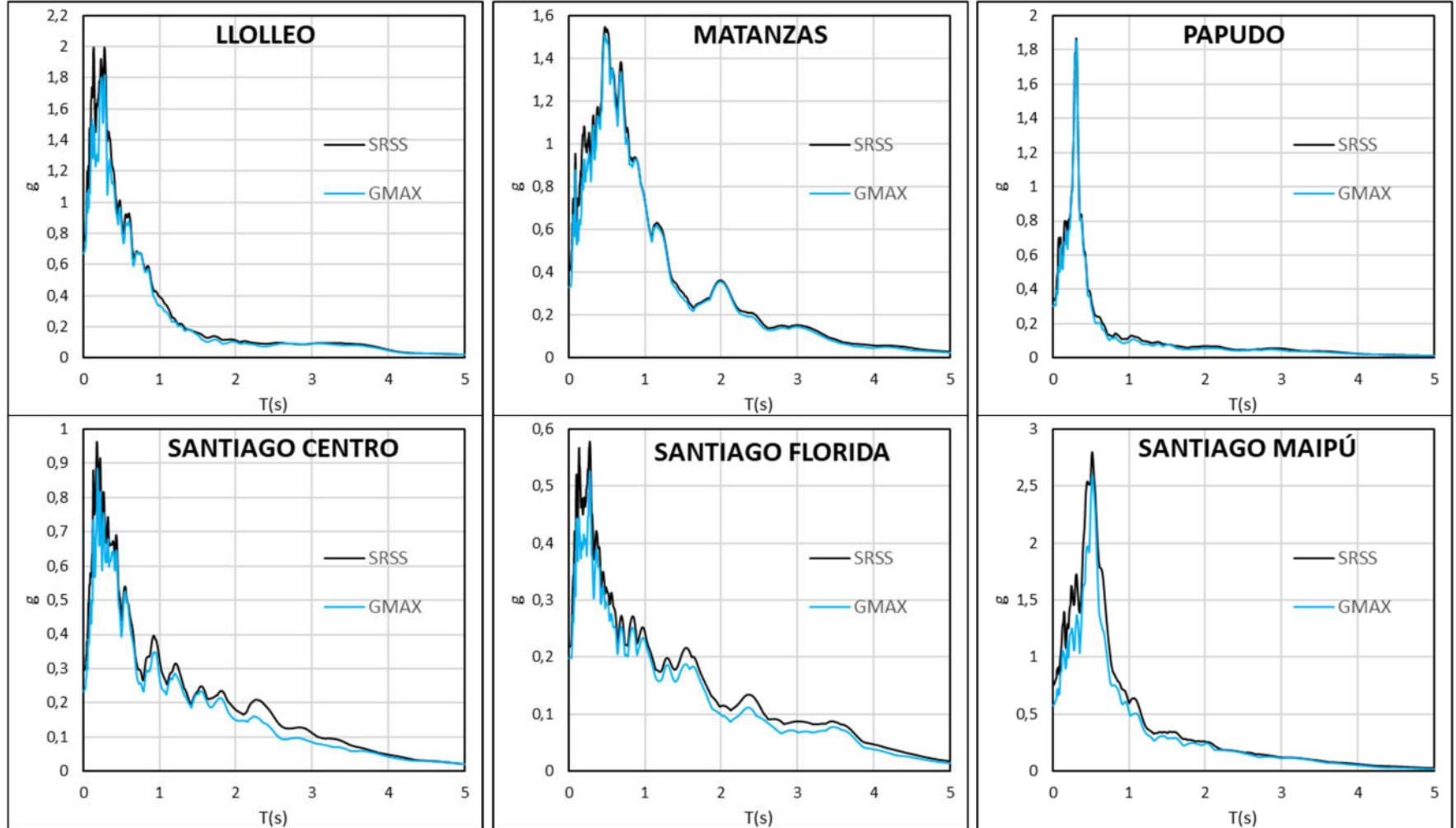


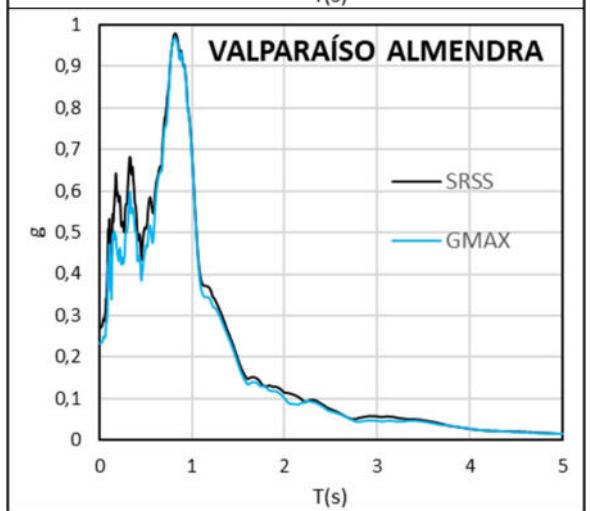
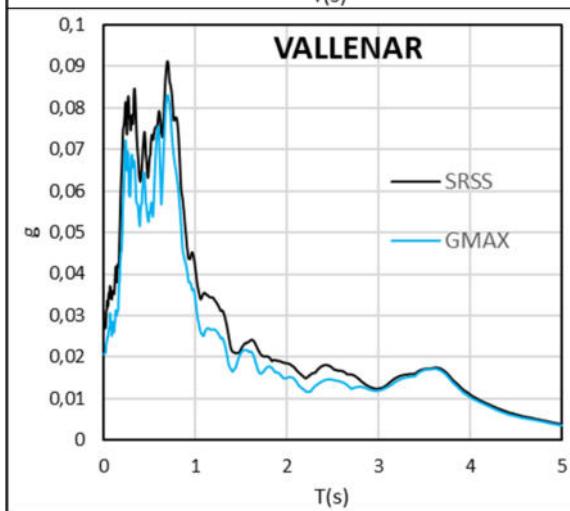
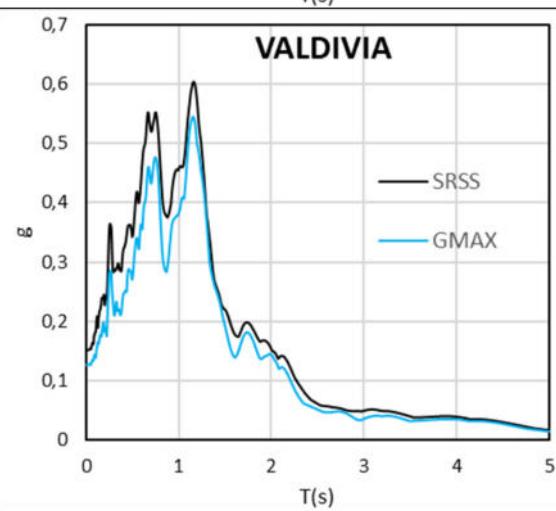
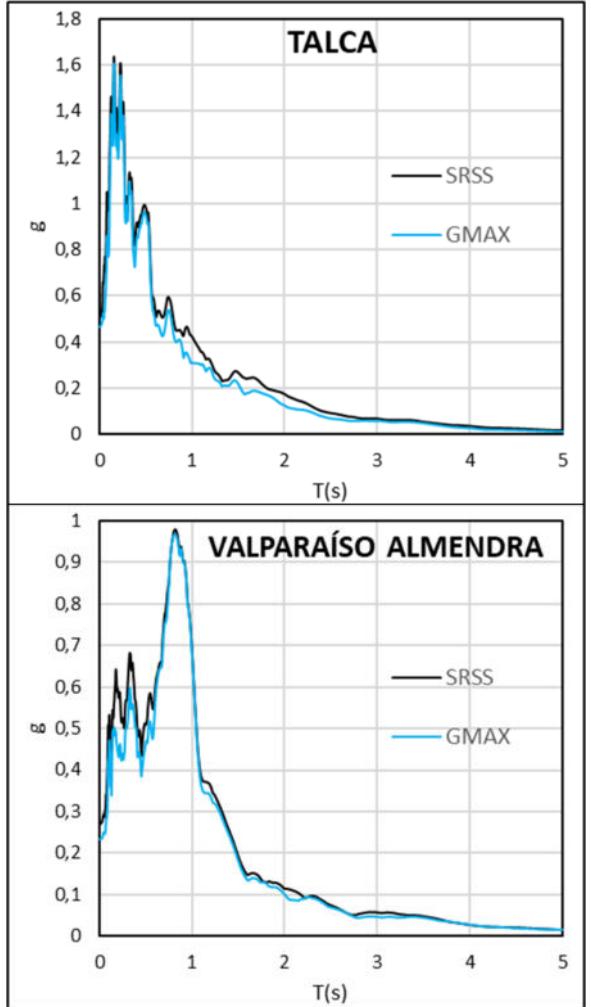
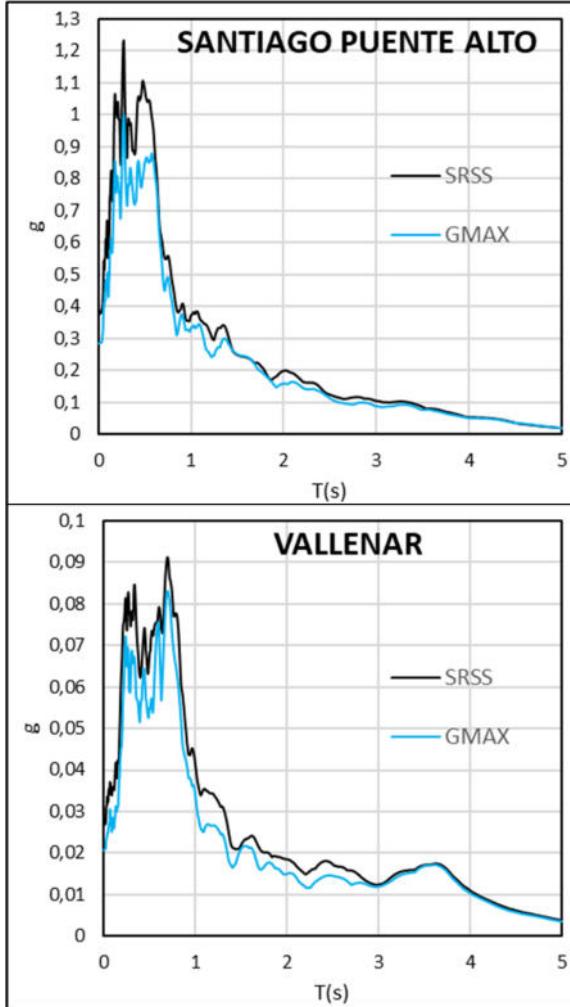
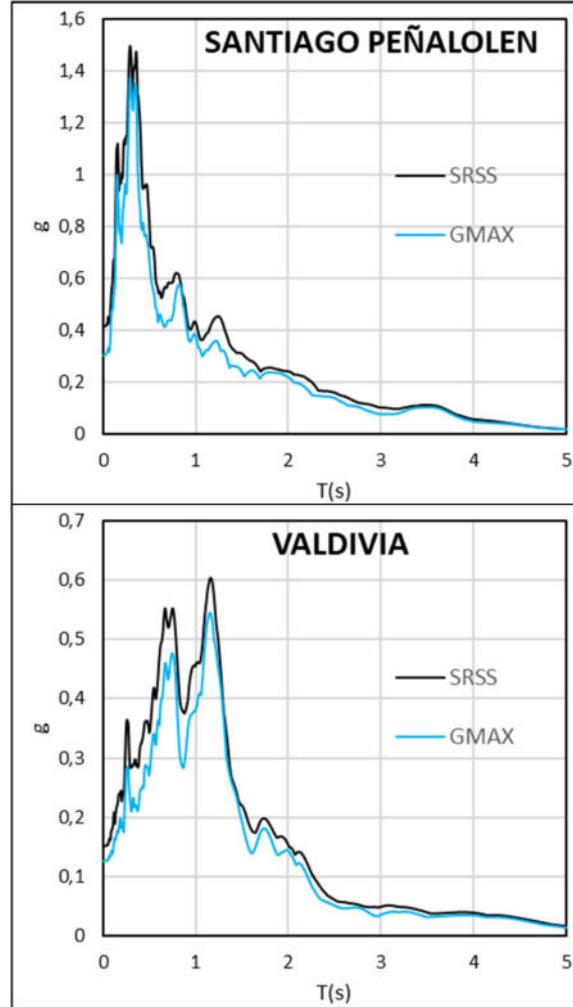


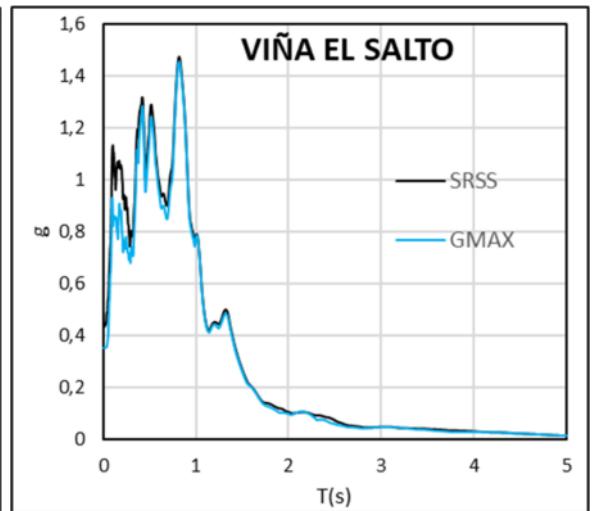
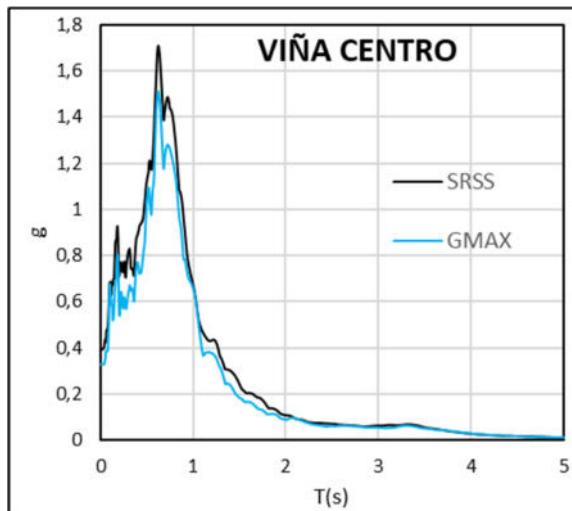
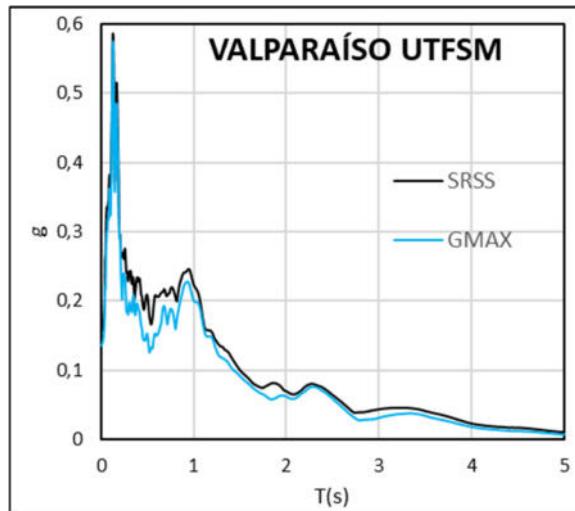


7.2.5. SRSS vs GMax

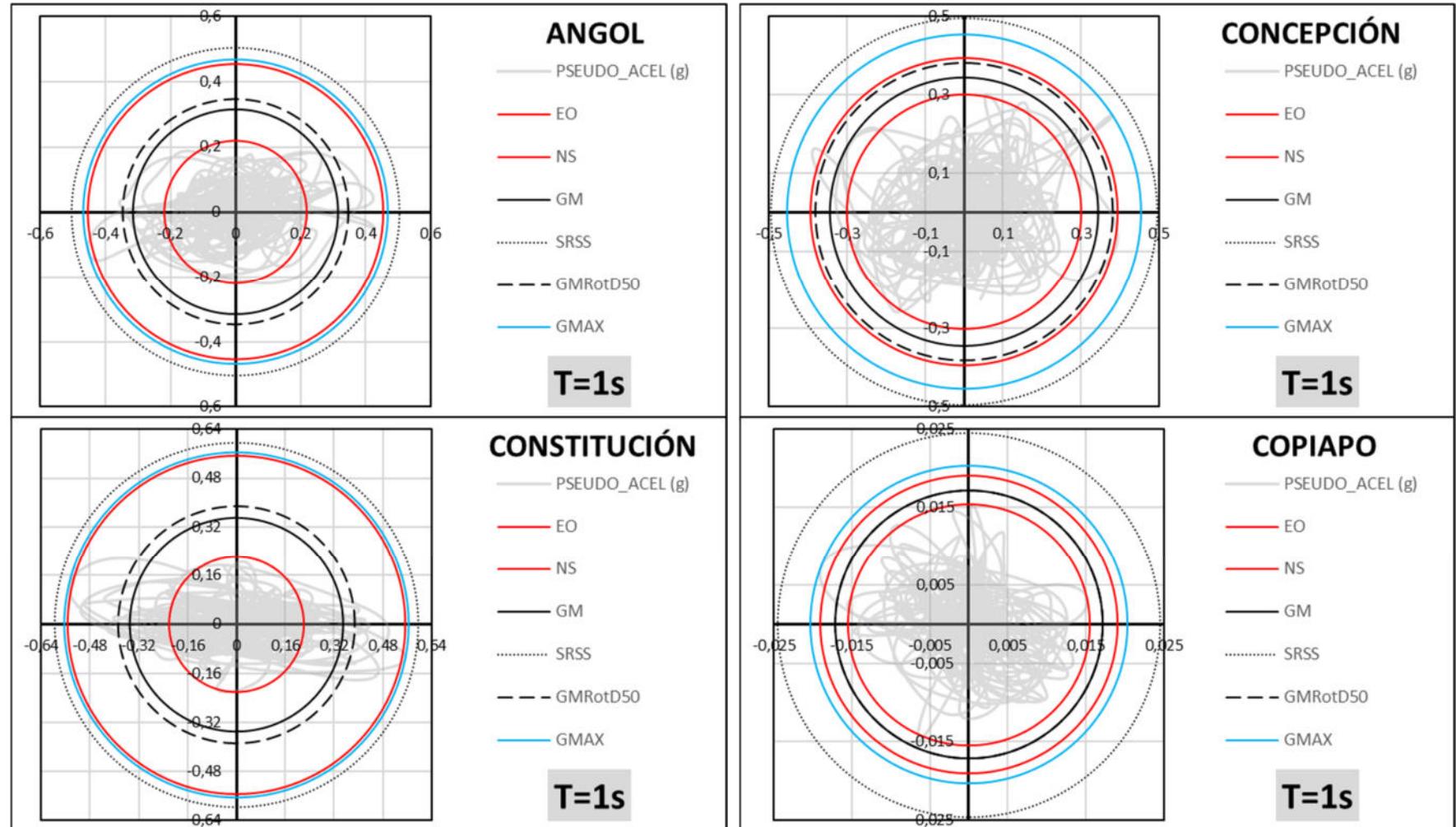


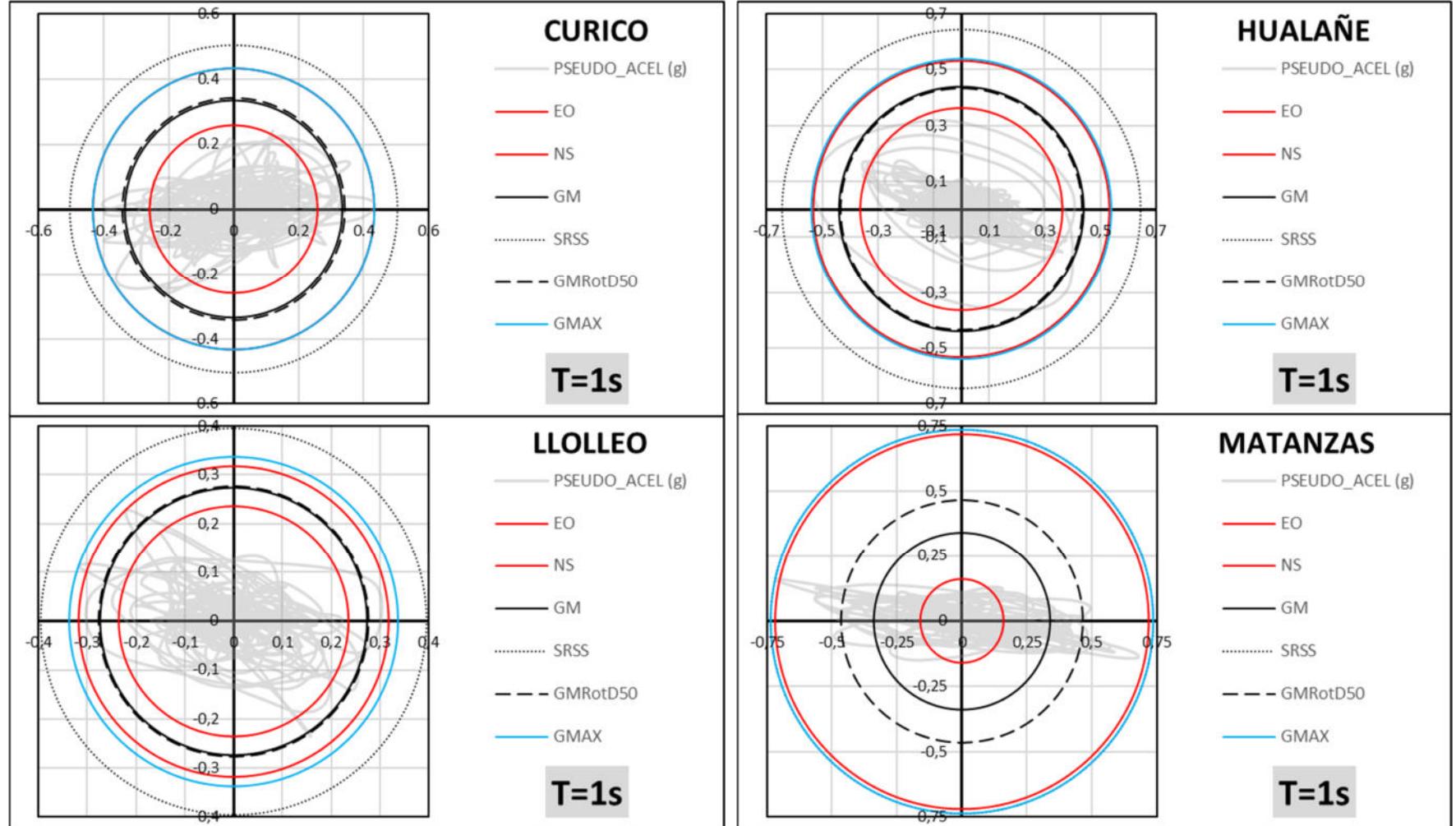


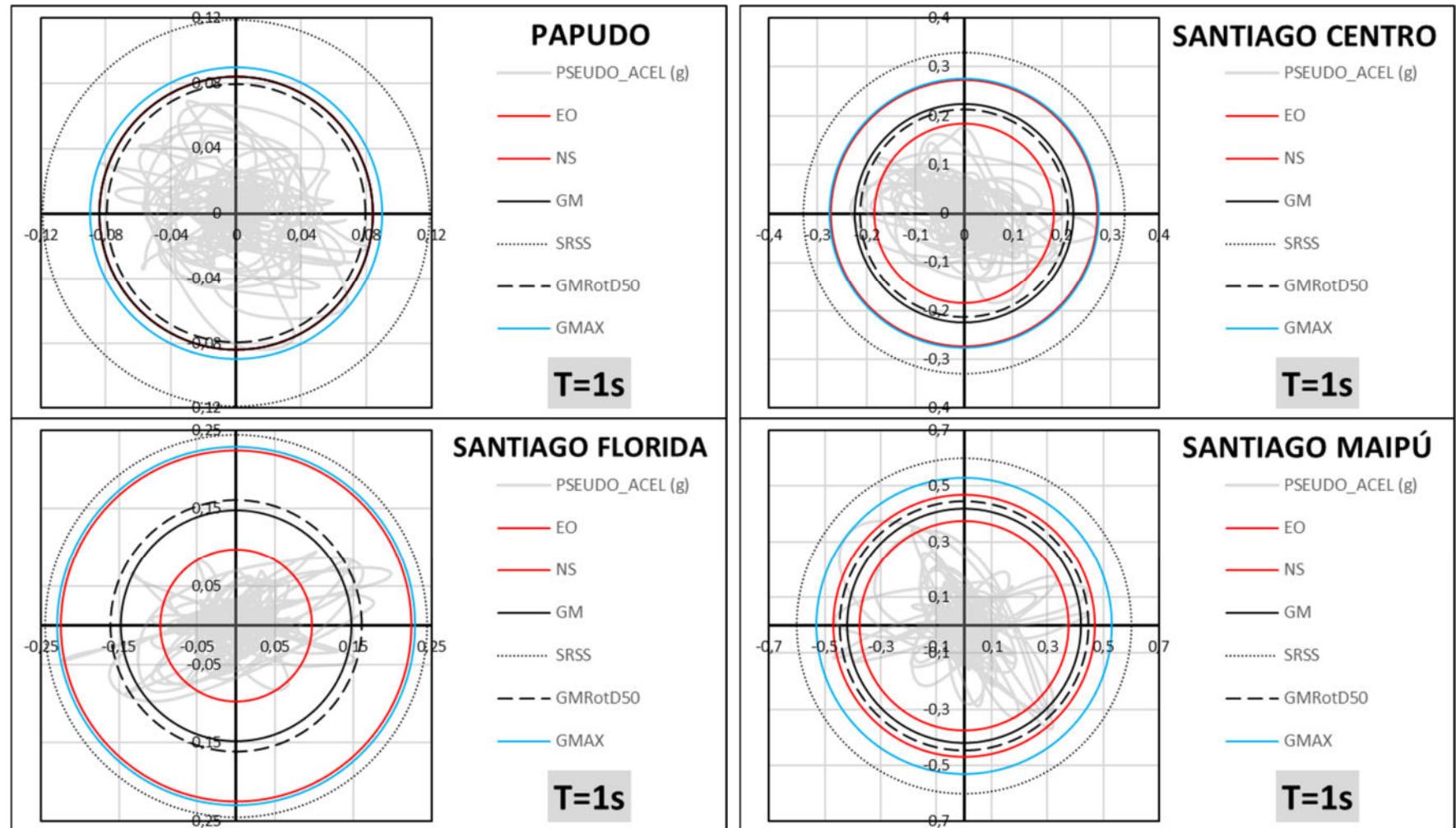


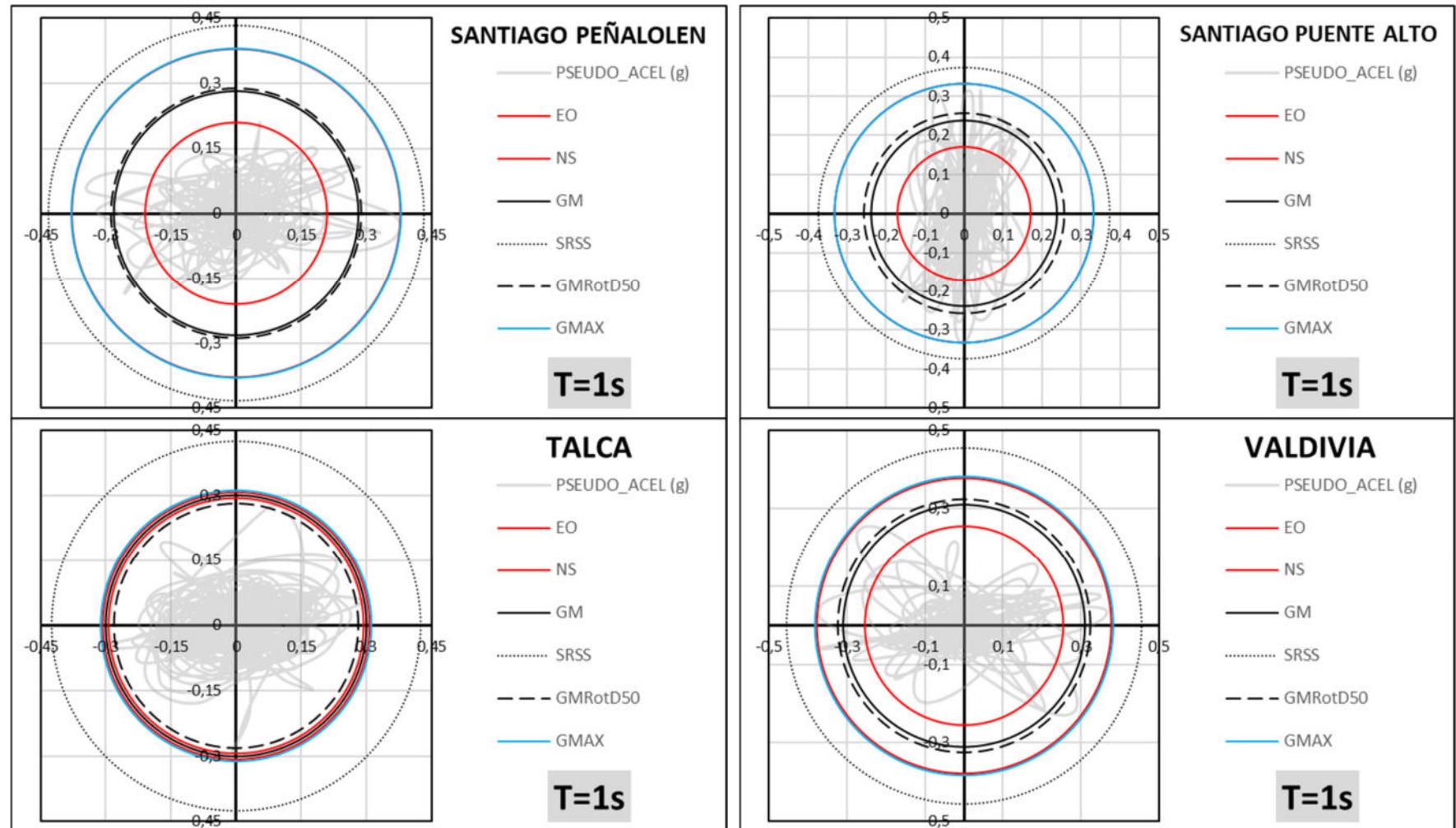


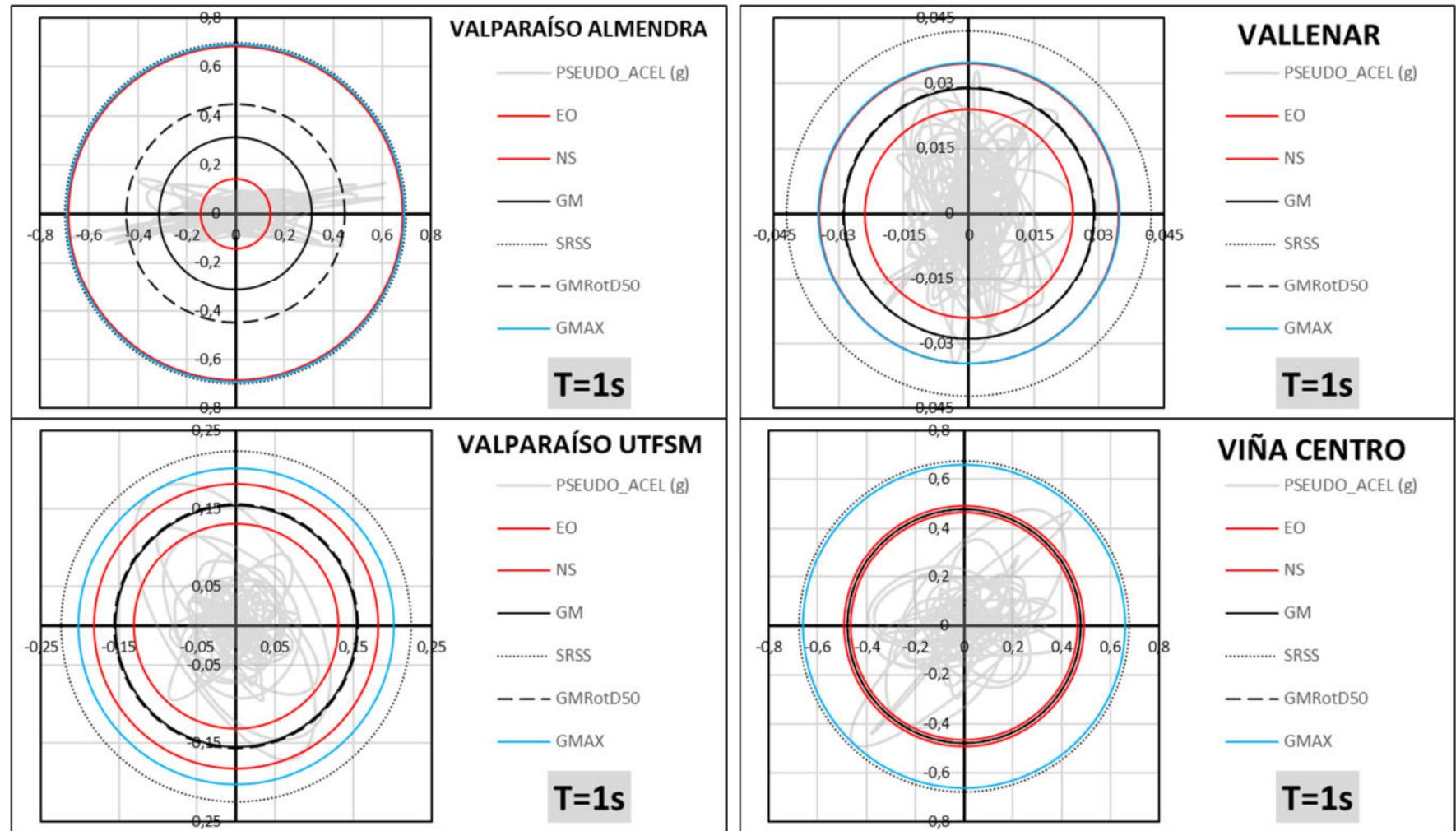
7.2.6. Respuesta de Pseudo Aceleraciones para T=1seg (EO, NS, SRSS, GMax, GM y GMRotD50)

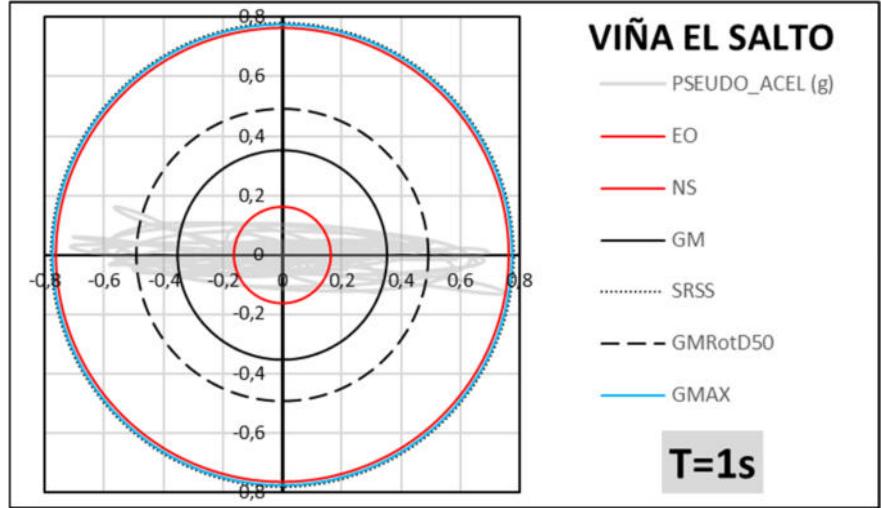




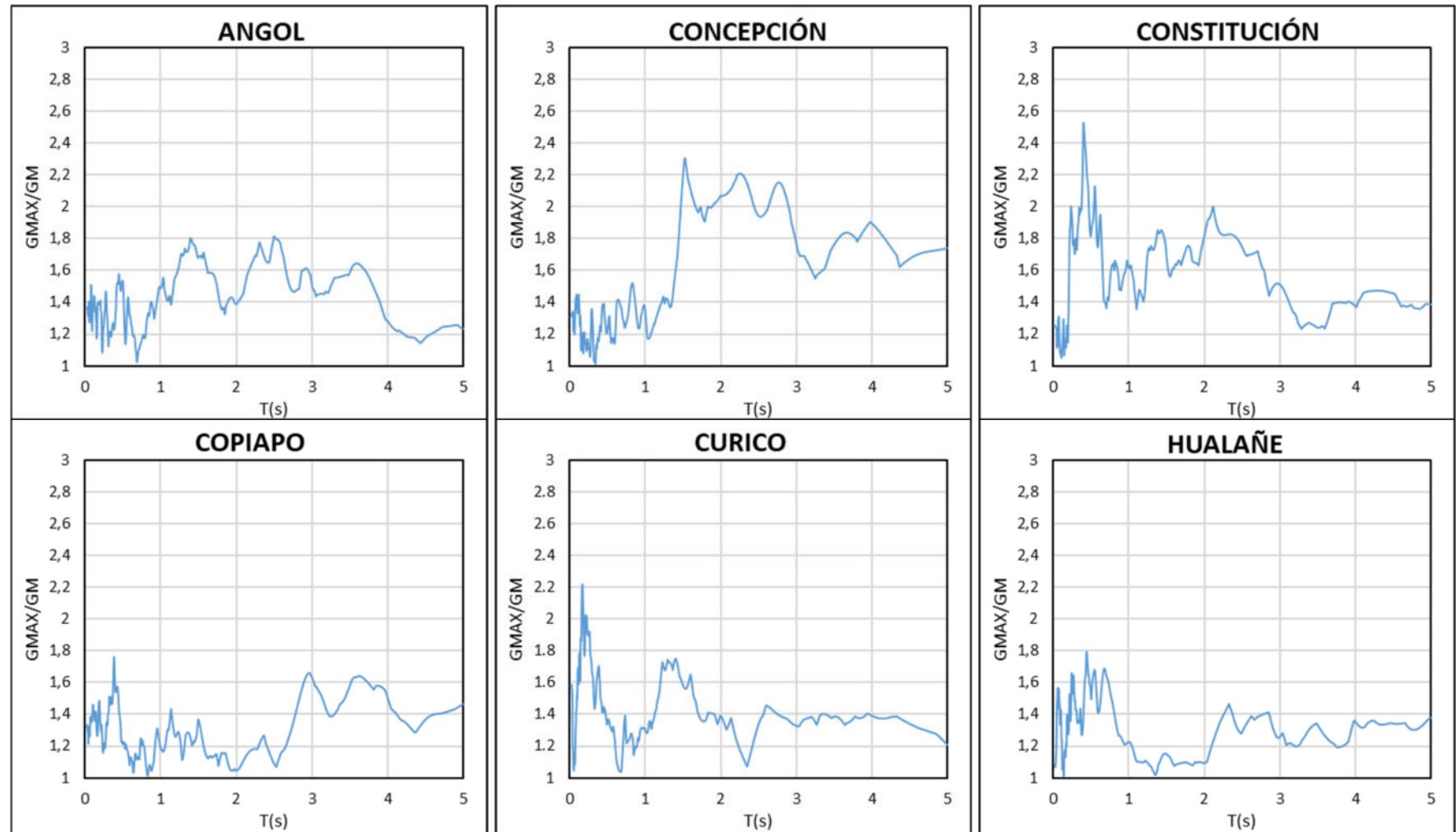


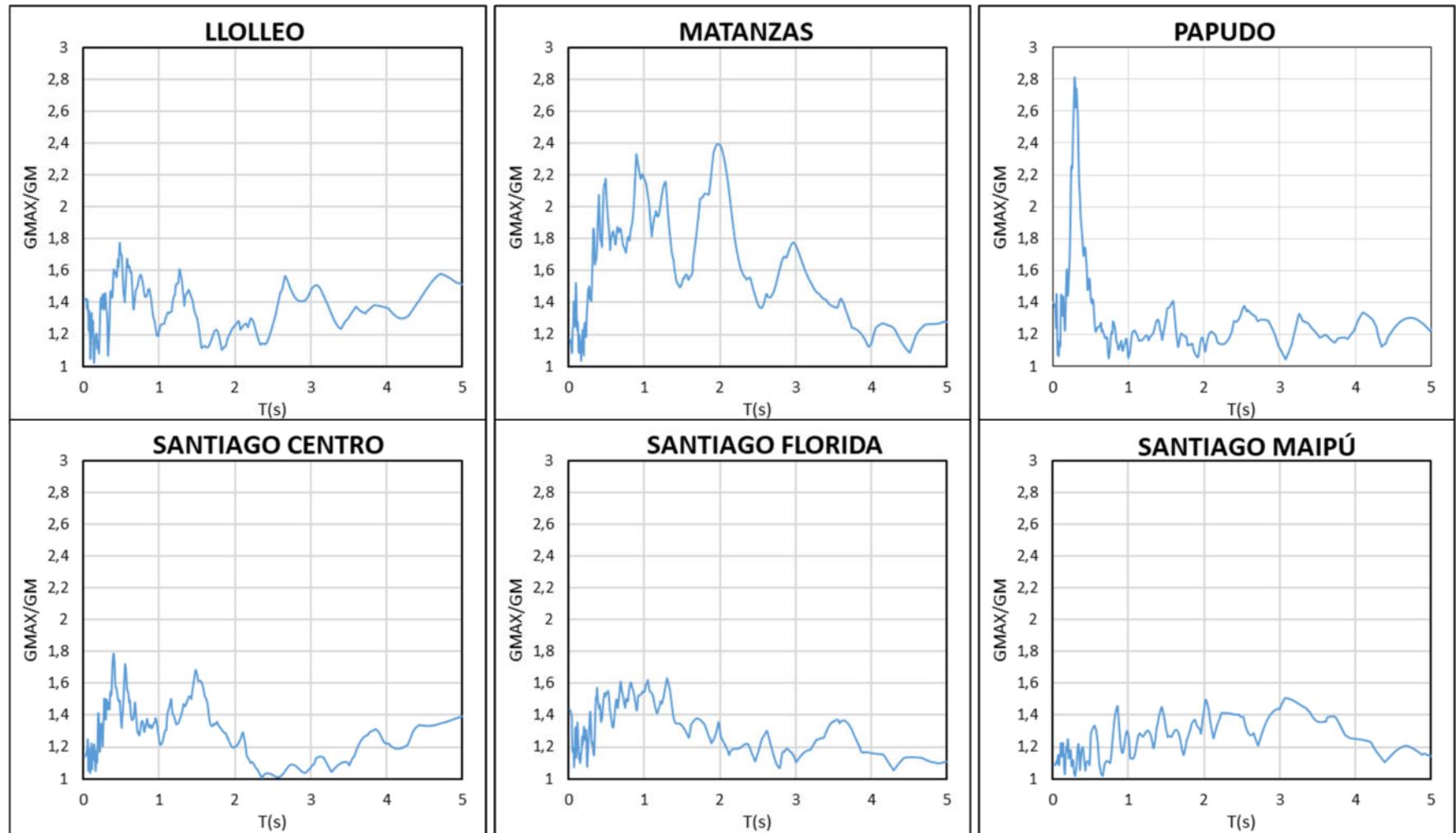


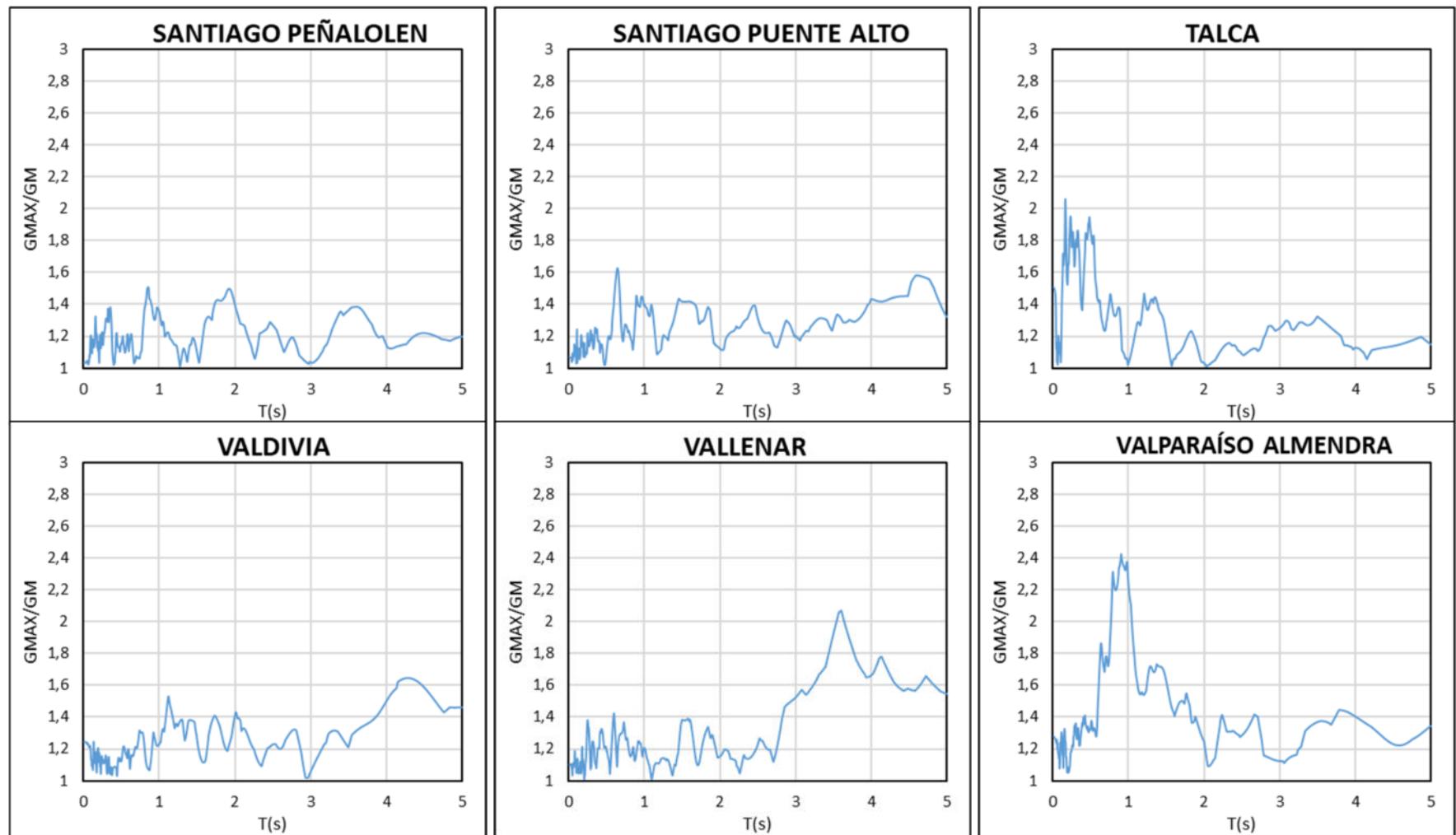


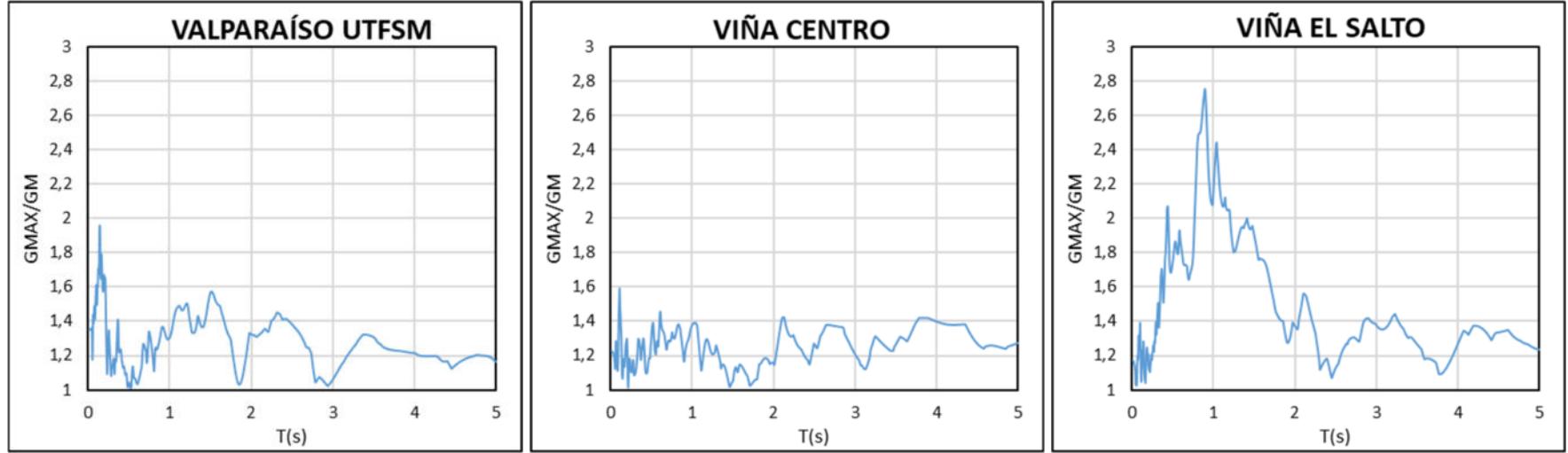


7.2.7. GMax/GM

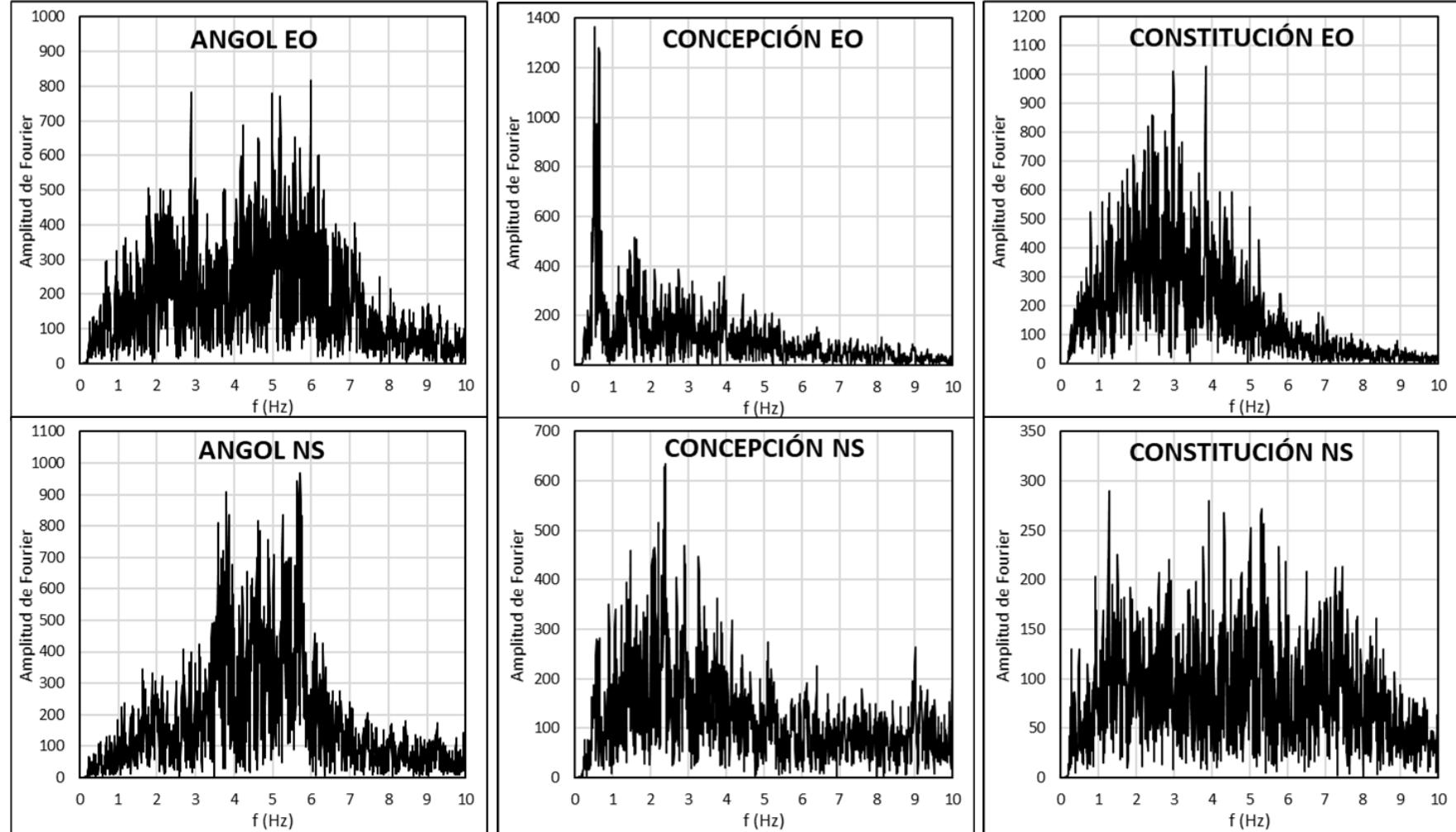


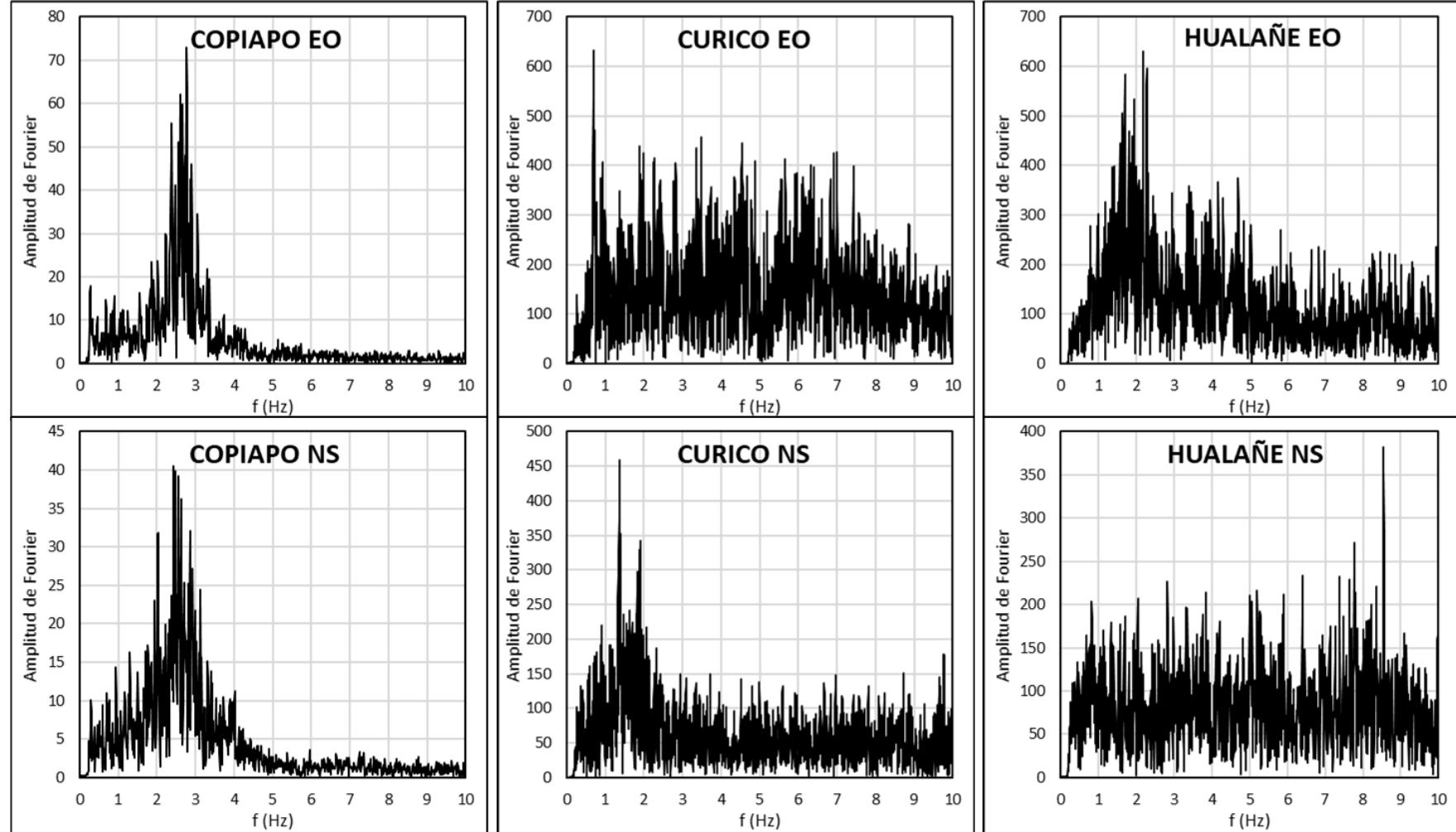


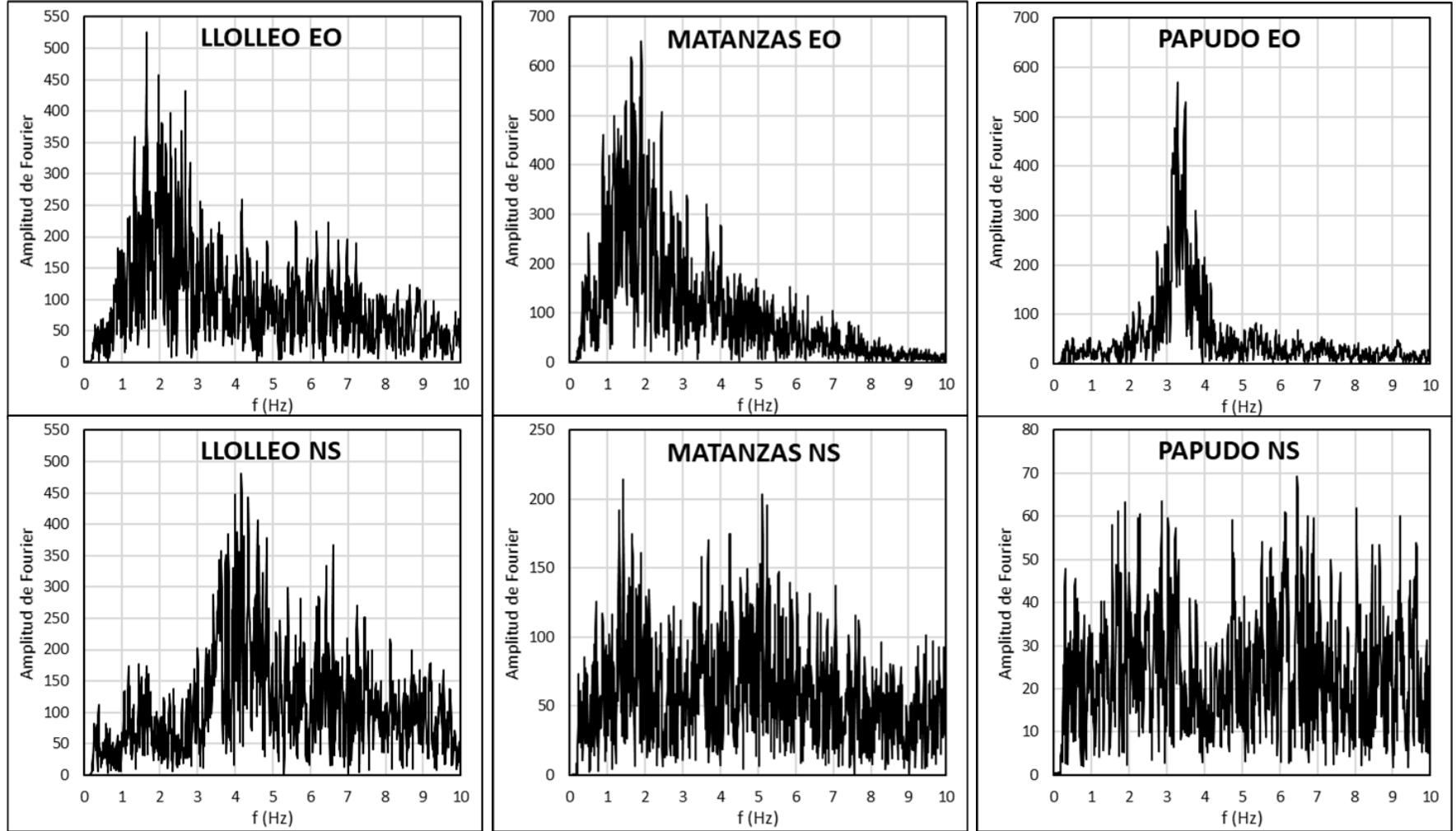


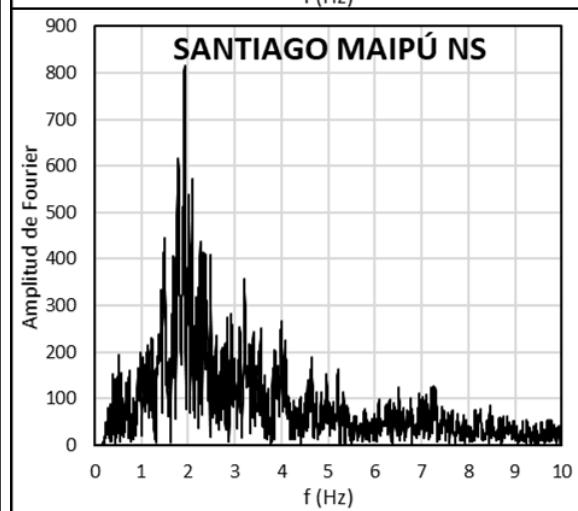
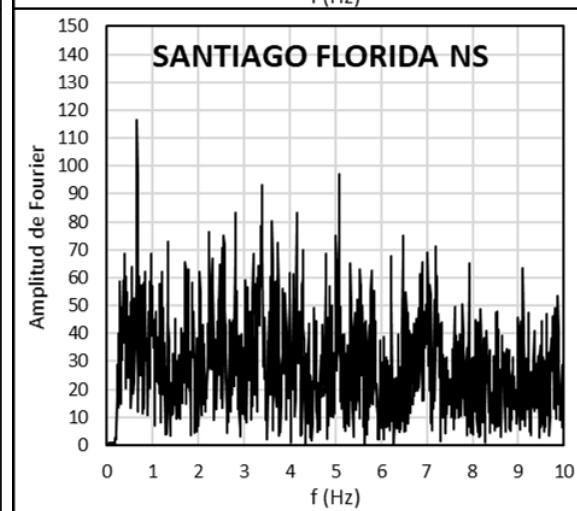
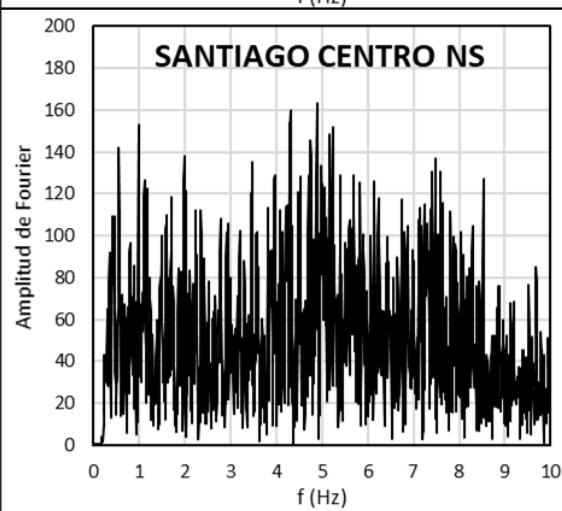
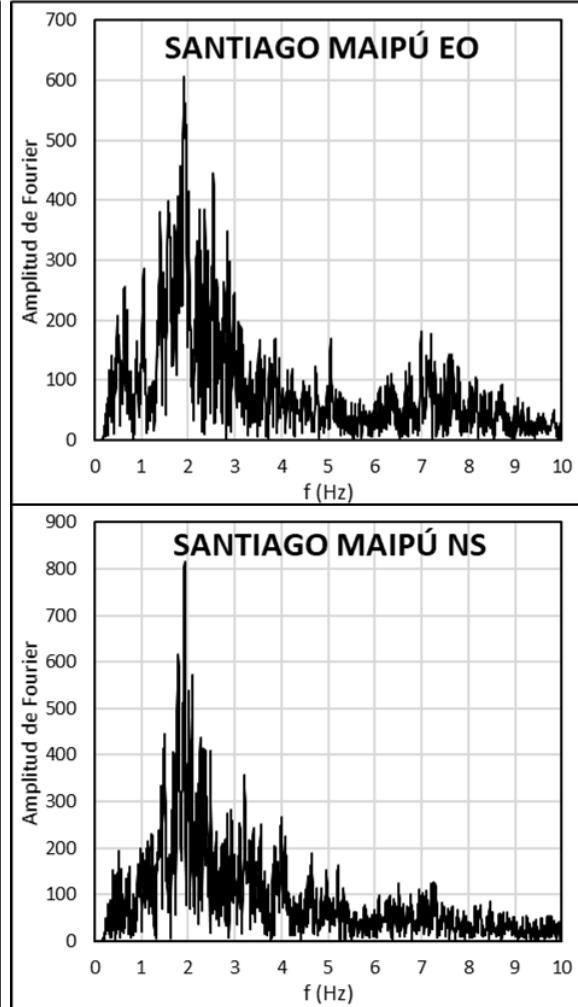
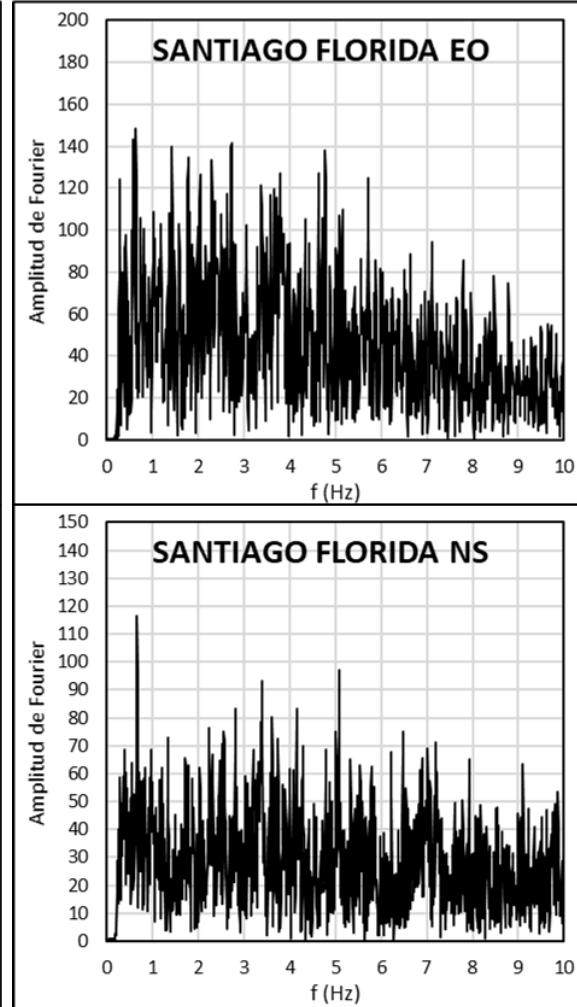
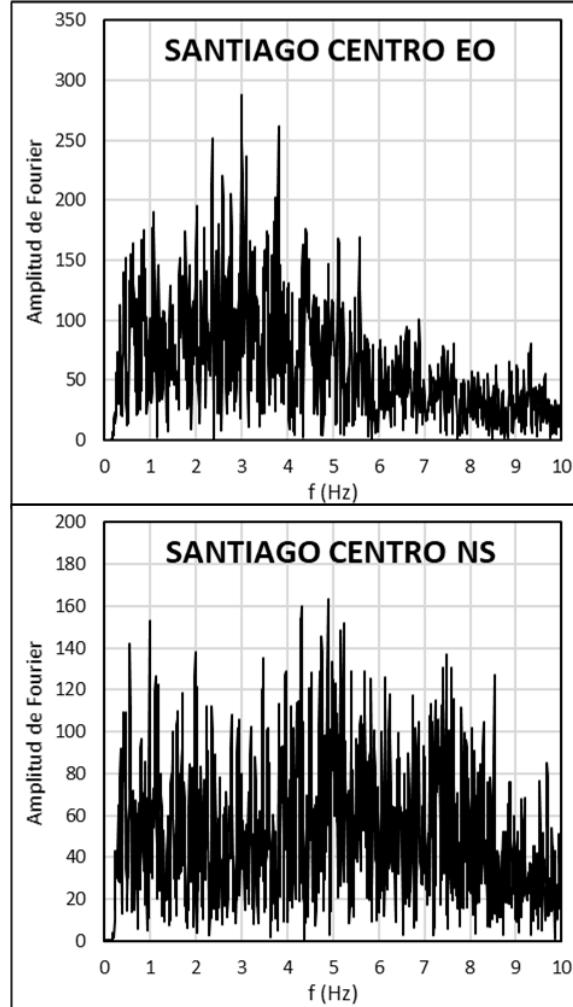


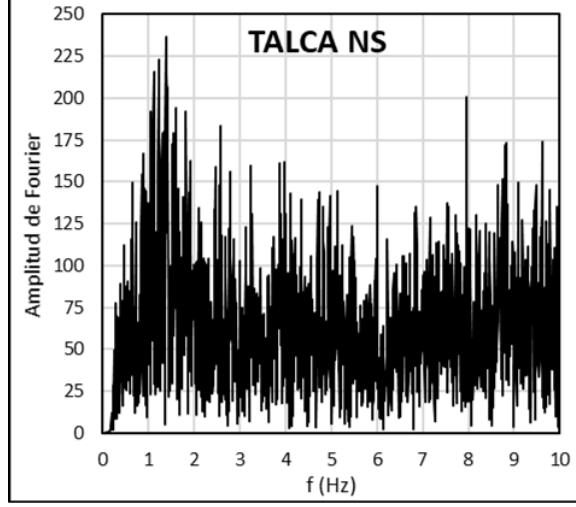
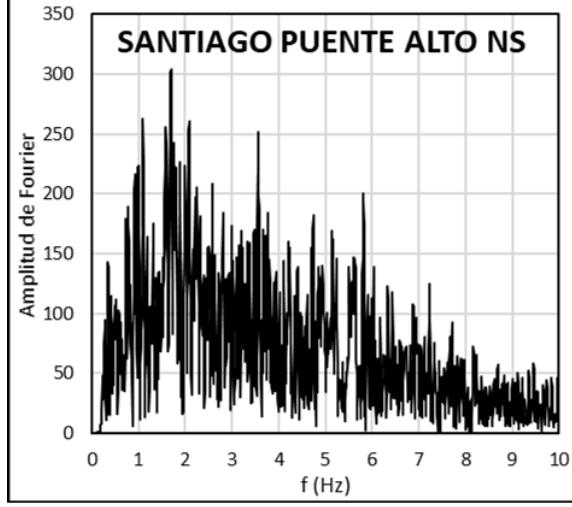
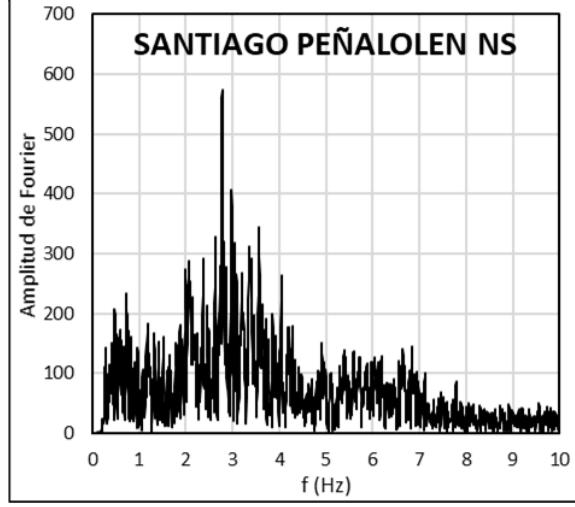
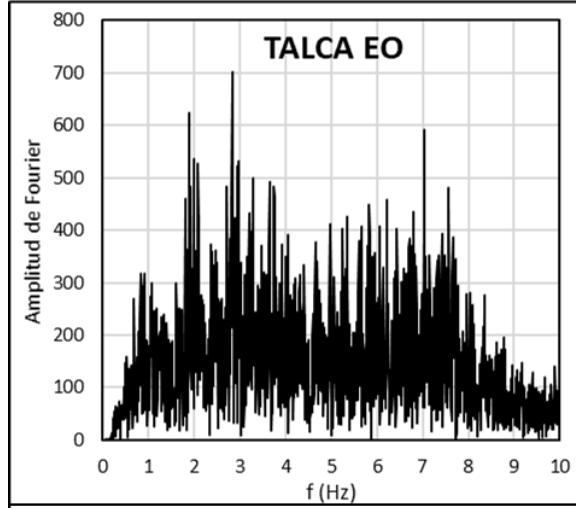
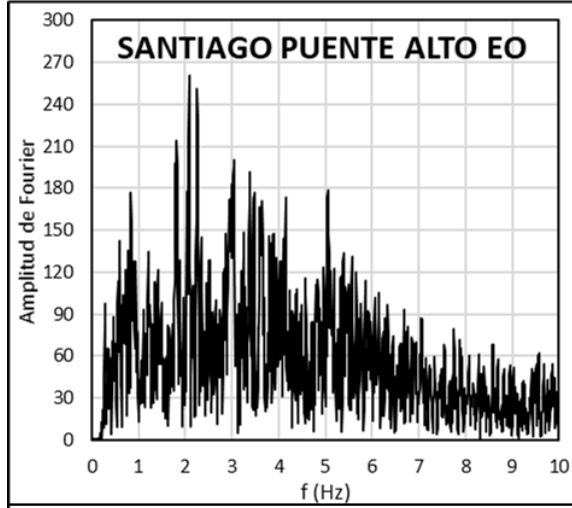
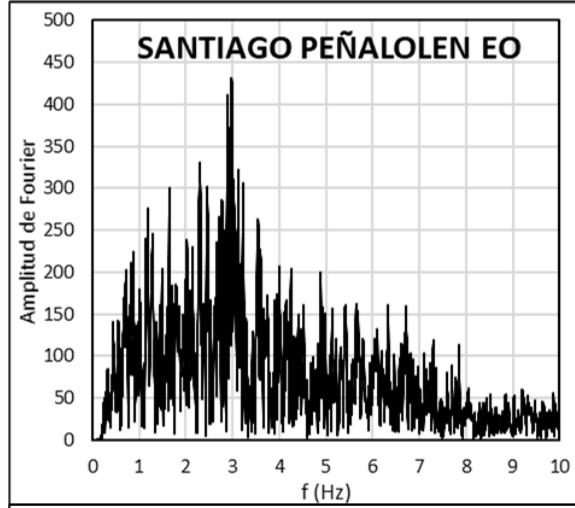
7.2.8. Espectro de frecuencias

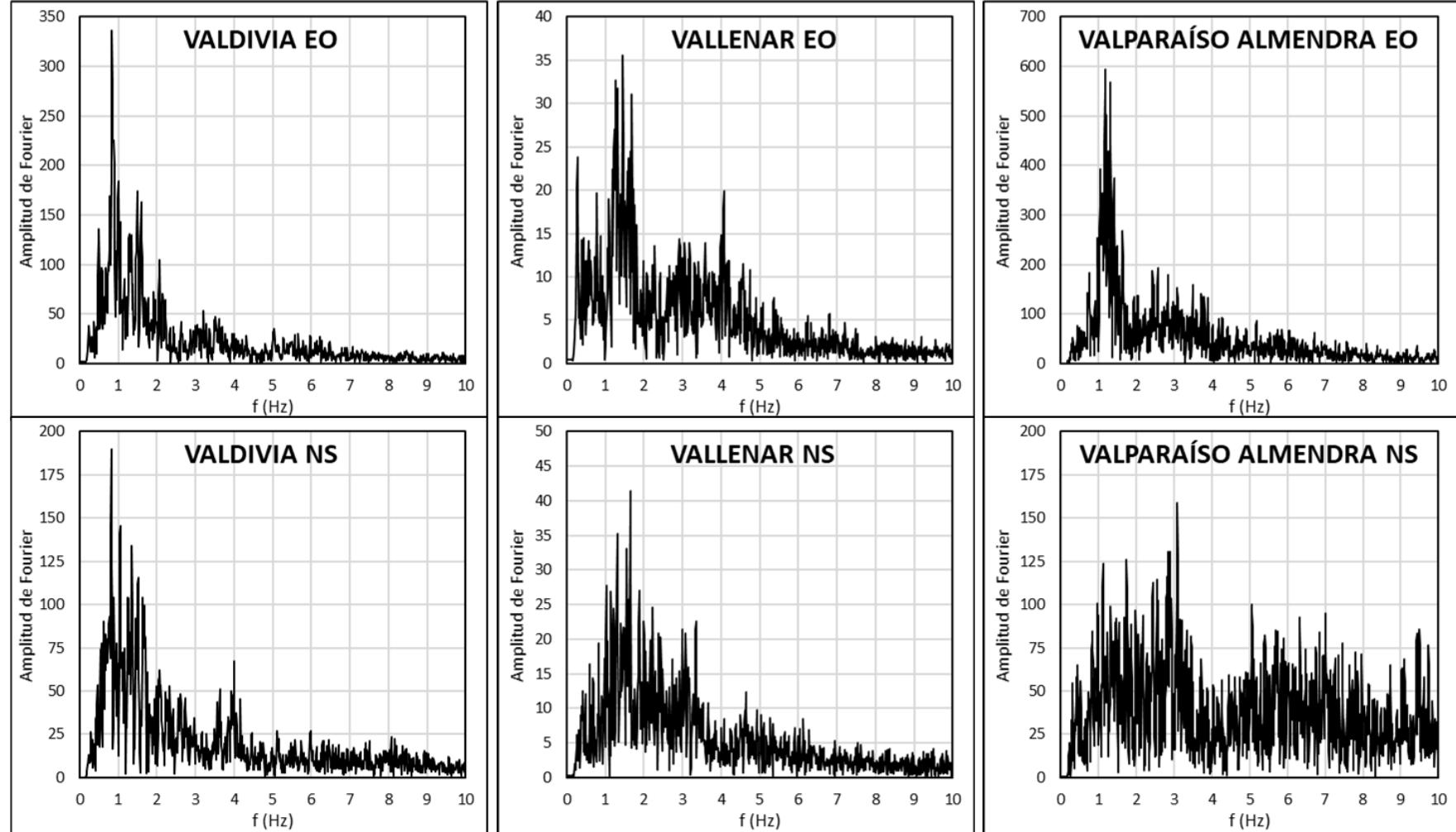


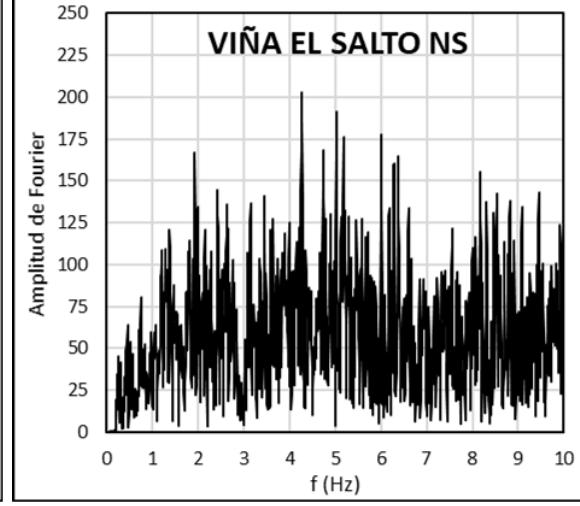
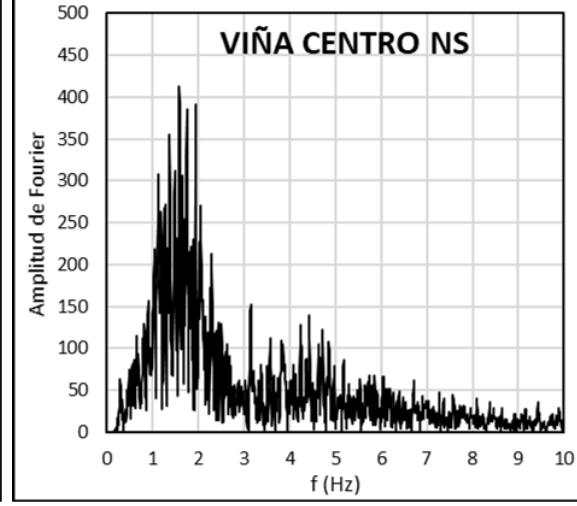
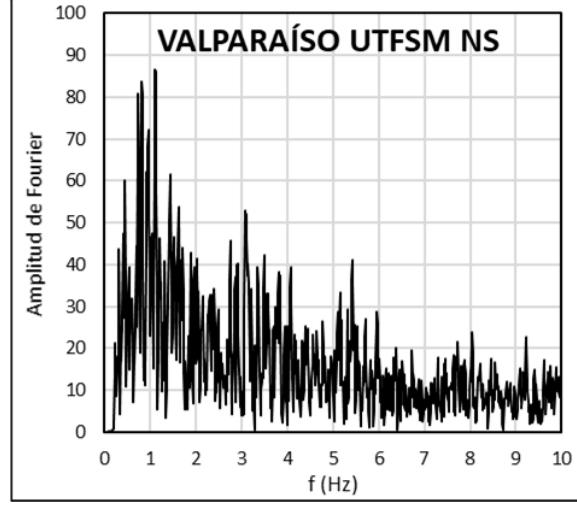
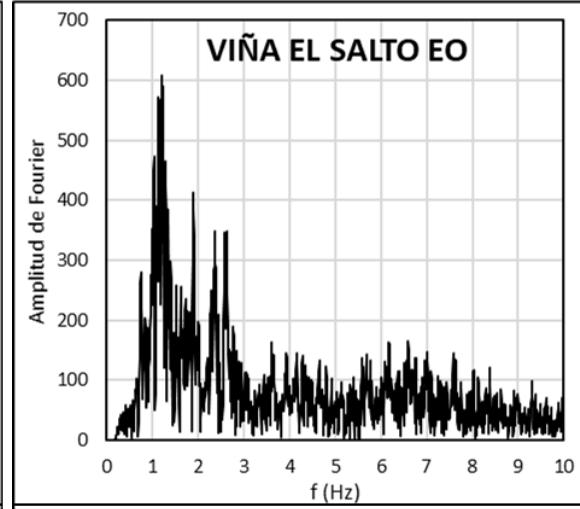
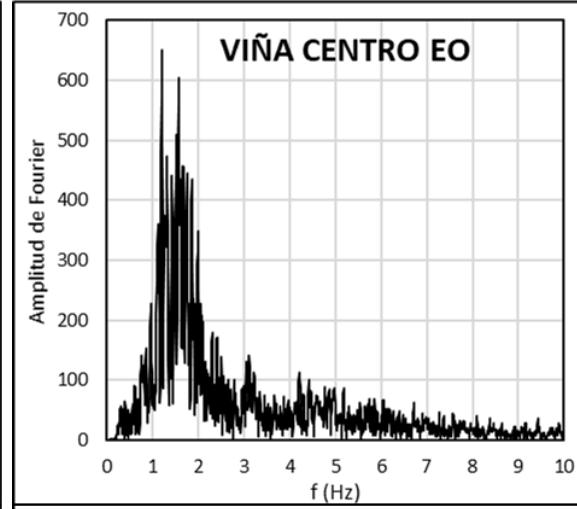
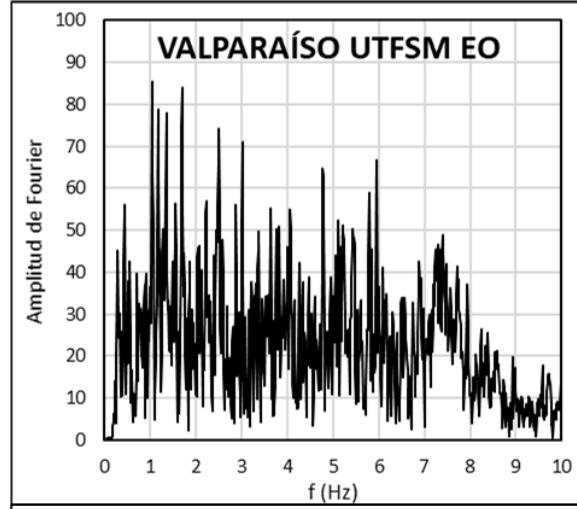














DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Suarez Saigua Miguel Vicente**, con C.C: # 0930560388 autor del trabajo de titulación: **Evaluación de combinación de componentes horizontales de registros sísmicos usando los métodos: GMax, GM, GMRotDpp, GMRotIpp y SRSS** previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, **26 de Febrero de 2020**

f. _____

Nombre: **Suarez Saigua, Miguel Vicente**

C.C: **0930560388**

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	Evaluación de combinación de componentes horizontales de registros sísmicos usando los métodos: GMax, GM, GMRotDpp, GMRotIpp y SRSS		
AUTOR(ES)	Miguel Vicente Suarez Saigua		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Jaime Francisco, Hernández Barredo		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Ingeniería		
CARRERA:	Ingeniería Civil		
TITULO OBTENIDO:	Ingeniero Civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	DE	26 de febrero de 2020	No. PÁGINAS: DE 186
ÁREAS TEMÁTICAS:	Registros Sísmicos, Espectro de Respuesta, Combinación de Espectro		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Espectros de respuesta, pseudo-aceleraciones, acelerogramas, período, rotaciones, factores de escala, componente y combinación.		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras): En el presente trabajo de titulación se estudiará los espectros elásticos de la combinación de registros sísmicos usando los métodos: GMax, GM, GMRotDpp, GMRotIpp y SRSS. Para el cálculo de las combinaciones espectrales de componentes horizontales ortogonales se desarrolló un código de programación el cual, mediante el método de Newmark (Chopra, 2014), calcula la respuesta dinámica de cada dirección para una estructura de 1 grado de libertad (aceleración, velocidad y desplazamiento) con un valor de amortiguamiento (ξ) constante de 5%. Además, se obtuvieron las pseudo-aceleraciones en base a la respuesta de desplazamientos.			

Se procesaron 50 pares de acelerogramas (29 registros del sismo de Ecuador-Pedernales 2016 y 21 registros del Sismo de Chile-Maule 2010). Se compararon las diferencias que existe entre los métodos de combinación de las componentes horizontales. Primero el estudio se centra en la diferencia entre los espectros obtenidos en las combinaciones GM, GMRotD y GMRotI. Luego, se estudia la diferencia que existe entre las combinaciones SRSS y GMax de una manera más detallada a lo realizado por (Lascano, 2018). Finalmente se evaluaron las diferencias encontradas entre las combinaciones GMax y GM, se proponen ecuaciones de conversión de GM a GMax y se compararon estas con los factores de escala de GMax/GM propuestos en la (American Society of Civil Engineers, 2017, p.205) .

ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-4-967548873-5020939	E-mail: vicent-30@hotmail.com
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::	Nombre: Clara Glass Cevallos	
	Teléfono: +593-4-2206956	
	E-mail: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec	
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA		
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):		
Nº. DE CLASIFICACIÓN:		
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):		