



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

**ESTUDIO DEL USO DE REGISTROS COMPATIBILIZADOS CON LOS  
ESPECTROS DE RESPUESTA PARA LA GENERACIÓN DE CURVAS DE  
FRAGILIDAD**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**SINAY ANDRÉS VEGA VILLA**

**PROFESOR GUÍA:**  
**FABIÁN ROJAS BARRALES**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**  
**SERGIO RUIZ TAPIA**  
**LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ**

**SANTIAGO DE CHILE**  
**NOVIEMBRE 2014**

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**POR:** Sinay Andrés Vega Villa

**FECHA:** 04/11/2014

**PROFESOR GUÍA:** Fabián Rojas Barrales

**ESTUDIO DEL USO DE REGISTROS COMPATIBILIZADOS CON LOS  
ESPECTROS DE RESPUESTA PARA LA GENERACIÓN DE CURVAS DE  
FRAGILIDAD**

En este trabajo de memoria de título se analiza y estudia el efecto que tiene compatibilizar registros de terremotos reales con un espectro de diseño o Target, para diferentes tipos de suelos. Entre los objetivos que se destacan del trabajo son la implementación en el software Matlab de un programa de compatibilización espectral, realizar una base de datos de registros compatibilizados y la generación de curvas de fragilidad a partir de dicha base datos.

En primer lugar, se revisó antecedentes generales acerca de un método de compatibilización espectral, el cual modifica el registro que se quiere compatibilizar en el tiempo agregando funciones wavelet, para posteriormente implementar dicho método en el software Matlab. Luego se hicieron diferentes estudios con el programa ya implementado, utilizando registros de terremotos chilenos compatibilizados a un Target, los cuales fueron comparados mediante la obtención de sus parámetros sísmicos tales como la aceleración máxima del suelo (PGA), Potencial Destructivo, etc. Después de efectuar diversos estudios con el programa implementado en Matlab, se hizo una base de datos de registros de terremotos chilenos compatibilizados a diferentes espectros utilizados como Target (considerando diferentes niveles de PGA), a partir de la cual finalmente se generaron curvas de fragilidad mediante la obtención de la respuesta de desplazamiento no lineal de un modelo estructural simplificado (para distintos rangos de PGA), el cual representa las características de los principales edificios chilenos de hormigón armado que se vieron dañados sustancialmente por el terremoto del Maule el 27 Febrero de 2010 en la Región Metropolitana, de manera de determinar distintos estados de daño de la estructura.

Los registros compatibilizados de la base de datos, y registros de terremotos relevantes de Chile, fueron analizados y comparados a partir de sus gráficos en escala logarítmica de Potencial Destructivo en función del PGA, de forma de visualizar la dispersión y tendencia de los datos. Mediante las comparaciones realizadas, se observó que la tendencia y propiedades de los registros compatibilizados dependen principalmente del espectro utilizado como Target y del registro inicial que se utiliza para realizar la compatibilización. Finalmente, a partir de las curvas de fragilidad, se analizó el estado de daño del modelo estructural, obteniéndose un incremento de probabilidad de daño a medida que el tipo de suelo utilizado para generar el Target exigía mayor demanda sísmica a la estructura.

## AGRADECIMIENTOS

En este momento quisiera agradecer a todas las personas que han estado conmigo y me han apoyado de alguna u otra forma en este trabajo.

En primer lugar me gustaría agradecer a toda mi familia, por brindarme todo el apoyo que necesité durante esta etapa y en general a lo largo de toda mi vida, ya que sin ellos no podría haber llegado hasta aquí.

Les agradezco a mis padres y a mi hermano por todo el apoyo y cariño que me han entregado en todo momento y por sobre todo en esta última etapa que ha sido tan larga. En especial agradezco a mi madre por todo su apoyo, cariño, paciencia y amor que me brinda cada día.

A mi Dami, por su apoyo, cariño y amor incondicional que me entrega siempre y por toda la alegría que me brinda cada día.

A mis amigos de siempre y de la universidad, con quienes he compartido gratos momentos a lo largo de estos años y me han dado un gran apoyo en este último tiempo.

A los profesores Fabián y Sergio, por haberme brindado el apoyo, paciencia, preocupación y dedicación necesaria y por todo lo me enseñaron durante este último tiempo para realizar este trabajo. Agradezco también al profesor Leonardo por sus consejos y sugerencias acerca del tema.

A Roberto, quien me ayudó y tuvo paciencia cada vez que acudí a él.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. ANTECEDENTES GENERALES .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	4
1.2.1. Objetivo General.....	4
1.2.2. Objetivos Específicos .....	4
1.3. ORGANIZACIÓN DEL INFORME .....	4
1.3.1. Capítulo 1: Introducción.....	4
1.3.2. Capítulo 2: Metodología.....	4
1.3.3. Capítulo 3: Estudio de Registros Compatibilizados.....	5
1.3.4. Capítulo 4: Base de Datos de Registros Compatibilizados .....	5
1.3.5. Capítulo 5: Análisis de Base de Datos de Registros Compatibilizados .....	5
1.3.6. Capítulo 6: Análisis Dinámico No Lineal .....	5
1.3.7. Capítulo 7: Curvas de Fragilidad.....	5
1.3.8. Capítulo 8: Conclusiones.....	5
<b>CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA PARA LA COMPATIBILIZACIÓN ESPECTRAL ....</b>	<b>6</b>
2.1. CÁLCULO DE ESPECTRO DE RESPUESTA .....	6
2.2. MÉTODO DE COMPATIBILIZACIÓN ESPECTRAL.....	10
2.2.1. Cálculo de Matriz “C” .....	14
2.2.2. Padding dinámico de la serie de tiempo de aceleración .....	15
2.2.3. Desajuste espectral .....	15
2.2.4. Metodología para realizar la compatibilización espectral .....	16
2.4. DESTRUCTIVIDAD SÍSMICA .....	18
2.4.1. Intensidad de Housner .....	18
2.4.2. Intensidad de Arias .....	19
2.4.3. Potencial Destructivo.....	20
2.5. ESPECTRO DE DISEÑO DE NORMA CHILENA NCH433 .....	21
2.5.1. Tipos de suelos .....	21
2.6. ESPECTRO DE RESPUESTA DE ACELERACIÓN CON DOS PEAKS .....	23
2.7. VALORES MÁXIMOS DEL SUELO .....	25
2.7.1. Aceleración máxima del suelo (PGA).....	25

2.7.2.	Velocidad máxima del suelo (PGV).....	26
2.7.3.	Desplazamiento máximo del suelo (PGD) .....	26
2.8.	DURACIÓN DE MOVIMIENTO FUERTE.....	26
2.9.	VALIDACIÓN DEL PROGRAMA IMPLEMENTADO EN MATLAB.....	27
<b>CAPÍTULO 3. ESTUDIO DE REGISTROS COMPATIBILIZADOS .....</b>		<b>28</b>
3.1.	AMPLIFICACIÓN DE REGISTROS COMPATIBILIZADOS A NORMA NCH 433 Of. 96 29	
3.2.	AMPLIFICACIÓN DE REGISTROS COMPATIBILIZADOS A ESPECTROS CON DOS PEAKS DE RUIZ Y SARAGONI (2008).....	35
3.3.	AMPLIFICACIÓN DE REGISTROS COMPATIBILIZADOS A ESPECTRO CON DOS PEAKS DE RUIZ Y SARAGONI (2008) CON UN 20% DE ERROR Y ESCALADO A PGA .....	40
3.4.	ESTUDIO DE REGISTROS DE CONCEPCIÓN .....	45
3.4.1.	Espectros de respuesta mediante Norma Chilena NCh433.....	45
3.4.2.	Espectros de respuesta mediante espectro con dos Peaks.....	51
3.4.3.	Resultados de Concepción Centro.....	56
3.4.4.	Resultados de Concepción San Pedro .....	59
3.4.5.	Estimador Misfit.....	61
3.4.6.	Discusión.....	62
3.4.7.	Espectrogramas de Concepción Centro Longitudinal.....	65
<b>CAPÍTULO 4. BASE DE DATOS DE REGISTROS COMPATIBILIZADOS.....</b>		<b>67</b>
4.1.	TARGETS UTILIZADOS.....	67
4.1.1.	Varios niveles de PGA .....	68
4.1.2.	Niveles de PGA de Norma .....	70
4.2.	BASE DE DATOS.....	72
<b>CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE BASE DE DATOS DE REGISTROS COMPATIBILIZADOS.....</b>		<b>77</b>
5.1.	ESPECTRO DE NORMA, PGA SELECCIONADOS .....	78
5.2.	ESPECTRO DE NORMA, A <sub>o</sub> SELECCIONADOS .....	87
5.3.	ESPECTRO DE NORMA Y DOS PEAKS.....	92
<b>CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL .....</b>		<b>97</b>
6.1.	ANÁLISIS NO LINEAL .....	97
6.2.	DESCRIPCIÓN DEL MODELO .....	102

6.3. RESULTADOS .....	106
<b>CAPÍTULO 7. CURVAS DE FRAGILIDAD.....</b>	<b>107</b>
7.1. ELEMENTOS PARA GENERACIÓN DE CURVAS DE FRAGILIDAD.....	108
7.1.1. Parámetro indicador de la intensidad.....	108
7.1.2. Modelo estructural.....	108
7.1.3. Parámetro indicador de daño .....	108
7.1.4. Análisis dinámico no lineal .....	108
7.2. ESTADOS LÍMITES DE UNA ESTRUCTURA .....	108
7.3. RESULTADOS .....	110
7.3.1. Espectro de Norma, PGA Seleccionados .....	110
7.3.2. Espectro de Norma y dos Peaks .....	113
7.3.3. Curvas realizadas considerando $\beta=2\%$ en el modelo estructural .....	116
7.4. COMPARACIÓN CON CURVAS DE JORQUERA (2014) .....	118
7.4.1. Curvas de Fragilidad de Jorquera .....	119
7.4.2. Comparación de curvas a partir de registros reales y registros compatibilizados .	120
7.5. ESTIMACIÓN DE CURVAS DE FRAGILIDAD .....	122
<b>CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES.....</b>	<b>128</b>
8.1. RESUMEN .....	128
8.2. CONCLUSIONES .....	129
8.2.1. Comparación de resultados mediante programas en RspMatch y Matlab.....	129
8.2.2. Análisis de resultados obtenidos mediante estudios preliminares del programa...	130
8.2.3. Análisis de resultados de base de datos de registros compatibilizados .....	132
8.2.4. Análisis de Curvas de Fragilidad.....	134
8.3. LIMITACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	135
8.3.1. Limitaciones del Trabajo .....	135
8.3.2. Trabajos Futuros .....	136
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>137</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>139</b>
A.1. EXPLICACIÓN DEL PROGRAMA DE COMPATIBILIZACIÓN ESPECTRAL....	139
A.2. MANUAL PARA RSPMATCH14.....	141
A.2.1. Programa RspMatch14.....	144
A.3. VALIDACIÓN DEL PROGRAMA IMPLEMENTADO EN MATLAB.....	151

A.3.1. REGISTRO CERRO CALÁN 2010 .....	152
Compatibilización Espectral .....	152
Destructividad Sísmica.....	156
A.3.2. COMPARACIÓN CON OTRAS MODIFICACIONES AL PROGRAMA .....	158
A.3.3. RESULTADOS DE OTROS REGISTROS.....	161
<b>ANEXO B.....</b>	<b>165</b>
B.1. AMPLIFICACIONES PARA ESPECTRO DE NORMA NCH433 .....	165
B.2. AMPLIFICACIONES PARA ESPECTRO CON DOS PEAKS.....	167
B.3. AMPLIFICACIONES PARA ESPECTRO CON DOS PEAKS CON UN 20% DE ERROR Y ESCALADO A PGA DE TARGET .....	169
<b>ANEXO C.....</b>	<b>171</b>
C.1. DISCRETIZACIÓN ESPECTROS PARA PGA NORMA.....	171
<b>ANEXO D.....</b>	<b>172</b>
D.1. ESPECTRO CON DOS PEAKS, PGA SELECCIONADOS .....	172
D.2. ESPECTRO CON DOS PEAKS, A <sub>o</sub> SELECCIONADOS.....	177
<b>ANEXO E.....</b>	<b>182</b>
E.1. CURVAS DE FRAGILIDAD, DOS PEAKS, PGA SELECCIONADOS .....	182
E.2. CURVAS DE FRAGILIDAD CONSIDERANDO UNA RAZÓN DE AMORTIGUAMIENTO $\beta$ DE 2% y 5% (ESPECTRO CON 2 PEAKS).....	184
<b>ANEXO F.....</b>	<b>186</b>
F.1. RESAMPLE DE REGISTROS PARA DISMINUIR TIEMPO DE EJECUCIÓN DEL PROGRAMA.....	186
F.1.1. Concepción Centro Longitudinal .....	186
F.1.2. Concepción San Pedro Longitudinal .....	188
F.1.3. Variación de tiempo.....	189

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Registros compatibilizados a Norma NCh2745 of2003. (a) Espectro base de diseño para zona 2 y los tres tipos de suelo para $\beta=0,05$ . (b) Registros sintéticos compatibles con los espectros de diseño de Figura 1.1 (a), para $\beta=0,05$ .	2
<b>Figura 1.2:</b> Representación de una wavelet.	3
<b>Figura 2.1:</b> Representación de un oscilador simple (Nigam y Jennings, 1969).	7
<b>Figura 2.2:</b> Aceleración de la base idealizada (Nigam y Jennings, 1969).	7
<b>Figura 2.3:</b> Serie de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento mediante el algoritmo de Lilhanand y Tseng (1988).	12
<b>Figura 2.4:</b> Series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento de wavelet considerada por Al Atik y Abrahamson (2010).	14
<b>Figura 2.5:</b> Diagrama de Flujo del procedimiento del método de compatibilización espectral.	17
<b>Figura 2.6:</b> Gráfico de intensidad de Arias en el tiempo para registro de Concepción San Pedro.	19
<b>Figura 2.7:</b> Potencial Destructivo versus Intensidad de Mercalli Modificada (Saragoni et al, 1989).	20
<b>Figura 2.8:</b> Espectro de diseño de Norma Chilena con DS N°61, utilizando diferentes tipos de suelos, para $A_0=0.4g$ .	22
<b>Figura 2.9:</b> Espectros con dos peaks comparados con el espectro de diseño de la Norma NCh433 Of. 96, para diferentes tipos de suelos y zonas sísmicas.	24
<b>Figura 2.10:</b> Espectro con dos peaks utilizando diferentes tipos de suelos, para $A_0=0.4g$ .	25
<b>Figura 2.11:</b> Series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento, y sus valores máximos.	26
<b>Figura 2.12:</b> Ejemplo de duración de movimiento fuerte (Jorquera, 2014).	27
<b>Figura 3.1:</b> Espectro de diseño de Norma NCh433 para suelo B y distintos niveles de PGA efectivos.	30
<b>Figura 3.2:</b> Espectros de aceleración de registros de Llole, Melipilla, Santiago y Talca y de Registros compatibilizados a distintos niveles de PGA efectivos (0.15g, 0.30g y 0.45g).	32
<b>Figura 3.3:</b> Espectros de Aceleración de registros compatibilizados a la Norma chilena para un PGA de 0.15g, 0.30g y 0.45g de los registros de Llole, Melipilla, Santiago y Talca.	33
<b>Figura 3.4:</b> Series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento para registro de Llole y del registro compatibilizado al espectro de la norma chilena para un PGA de 0.15g, 0.30g y 0.45g.	34
<b>Figura 3.5:</b> Espectro con dos peaks para suelo tipo B y distintos niveles de PGA efectivos (0.15g, 0.30g y 0.45g).	36

<b>Figura 3.6:</b> Espectros de Aceleración de registros de Llolleo, Melipilla, Santiago y Talca y de Registros compatibilizados a distintos niveles de PGA efectivos (0.15g, 0.30g y 0.45g). .....	39
<b>Figura 3.7:</b> Espectros de Aceleración de registros compatibilizados a espectro con dos Peaks para un PGA de 0.15g, 0.30g y 0.45g de los registros de Llolleo, Melipilla, Santiago y Talca. ..	39
<b>Figura 3.8:</b> Espectros de Aceleración de registros de Llolleo, Melipilla, Santiago y Talca y de Registros compatibilizados a espectro con dos peaks para un error de 20% y escalado a PGA, para distintos niveles de PGA efectivos (0.15g, 0.30g y 0.45g).....	43
<b>Figura 3.9:</b> Espectros de respuesta de registros compatibilizados a espectro con dos Peaks con 5% y 20% de error escalado a PGA, para un PGA de 0.15g, 0.30g y 0.45g de los registros de Llolleo, Melipilla, Santiago y Talca. ....	44
<b>Figura 3.10:</b> Espectro de respuesta de Concepción Centro Longitudinal y Registro Compatibilizado al espectro de diseño de la norma NCh433.....	47
<b>Figura 3.11:</b> Espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento de registro de Concepción Centro Longitudinal (azul) y de registro compatibilizado a espectro de diseño de la norma NCh433 (rojo). ....	48
<b>Figura 3.12:</b> Series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento de registro de Concepción Centro Longitudinal (azul) y de registro compatibilizado a espectro de diseño de la norma NCh433 (rojo). ....	49
<b>Figura 3.13:</b> Series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento de registro de Concepción Centro Longitudinal (azul) y de registro compatibilizado a espectro de diseño de la norma NCh433 (rojo), ampliadas en donde se observa la mayor modificación del registro. ....	49
<b>Figura 3.14:</b> Series de tiempo de aceleración de registro de Concepción Centro Longitudinal (azul) y de registro compatibilizado a espectro de diseño de la norma NCh433 (rojo), ampliadas para observar de mejor manera la modificación del registro.....	50
<b>Figura 3.15:</b> Intensidad de Arias normalizado, Concepción Centro Longitudinal (azul) versus registro compatibilizado a espectro de diseño de la norma NCh433 (rojo). ....	50
<b>Figura 3.16:</b> Espectros de respuesta de aceleración de Concepción Centro Longitudinal y Registro Compatibilizado a los espectros con dos peaks de Ruiz y Saragoni (2008).....	52
<b>Figura 3.17:</b> Espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento de registro de Concepción Centro Longitudinal (azul) y de registro compatibilizado a espectro con dos peaks (rojo). ....	53
<b>Figura 3.18:</b> Series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento de registro de Concepción Centro Longitudinal (azul) y de registro compatibilizado a espectro con dos peaks de Ruiz y Saragoni (rojo). ....	54
<b>Figura 3.19:</b> Series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento de registro de Concepción Centro Longitudinal (azul) y de registro compatibilizado a espectro con dos peaks (rojo), ampliadas en donde se observa la mayor modificación del registro. ....	54

<b>Figura 3.20:</b> Series de tiempo de aceleración de registro de Concepción Centro Longitudinal (azul) y de registro compatibilizado a espectro con dos peaks (rojo), ampliadas para observar de mejor manera la modificación del registro. ....	55
<b>Figura 3.21:</b> Intensidad de Arias normalizado, Concepción Centro Longitudinal (azul) versus registro compatibilizado a espectro con dos peaks (rojo). ....	55
<b>Figura 3.22:</b> Comparación de espectros de Registros de Concepción Centro en sus dos direcciones. (a) Registro Longitudinal compatibilizado a Norma. (b) Registro Longitudinal compatibilizado a espectro con dos Peaks. (c) Registro Transversal compatibilizado a Norma. (d) Registro Transversal compatibilizado a espectro con dos Peaks. ....	57
<b>Figura 3.23:</b> Espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento de registro compatibilizado a norma NCh433 y de registro compatibilizado a espectro con dos peaks de Ruiz y Saragoni (2008). ....	58
<b>Figura 3.24:</b> Series de tiempo de aceleración de registro de Concepción Centro Longitudinal y de registro compatibilizado a espectro de Norma NCh433 y a espectro con dos peaks. ....	58
<b>Figura 3.25:</b> Comparación de espectros de Registros de Concepción San Pedro en sus dos direcciones. (a) Registro Longitudinal compatibilizado a Norma. (b) Registro Longitudinal compatibilizado a espectro con dos Peaks. (c) Registro Transversal compatibilizado a Norma. (d) Registro Transversal compatibilizado a espectro con dos Peaks. ....	60
<b>Figura 3.26:</b> Espectro de respuesta de Concepción Centro Transversal y Registro Compatibilizado al espectro de diseño de la norma NCh433.....	62
<b>Figura 3.27:</b> Espectro de respuesta de Concepción Centro Transversal y Registro Compatibilizado al espectro con dos peaks de Ruiz y Saragoni. ....	63
<b>Figura 3.28:</b> Espectro de respuesta de Registro de Concepción Centro Longitudinal y de Registros Compatibilizados. (a) Registro compatibilizado a Norma. (b) Registro compatibilizado a espectro con dos Peaks. ....	64
<b>Figura 3.29:</b> Espectro de respuesta de Registro de Concepción San Pedro Longitudinal y de Registros Compatibilizados. (a) Registro compatibilizado a Norma. (b) Registro compatibilizado a espectro con dos Peaks. ....	64
<b>Figura 3.30:</b> Espectrogramas de Concepción Centro Longitudinal. (a) Espectrograma de Concepción Centro Longitudinal original. (b) Espectrograma de Concepción Centro Longitudinal compatibilizado a espectro de Norma NCh433. (c) Espectrograma de Concepción Centro Longitudinal compatibilizado a espectro con dos Peaks.....	65
<b>Figura 4.1:</b> Comparación de espectros de Norma NCh433 y dos Peaks para distintos niveles de PGA y distintos tipos de suelo. (a) Espectros generados para suelo tipo A. (b) Espectros generados para suelo tipo B. (c) Espectros generados para suelo tipo C. (d) Espectros generados para suelo tipo D. (e) Espectros generados para suelo tipo E.....	69
<b>Figura 4.2:</b> Comparación de espectros de Norma NCh433 y dos Peaks para niveles de PGA de Norma. (a) Espectros generados para suelo tipo A. (b) Espectros generados para suelo tipo B. (c)	

Espectros generados para suelo tipo C. (d) Espectros generados para suelo tipo D. (e) Espectros generados para suelo tipo E. ....	71
<b>Figura 4.3:</b> Esquema de Base de Datos (primera parte). ....	75
<b>Figura 4.4:</b> Esquema de Base de Datos (segunda parte). ....	76
<b>Figura 5.1:</b> Potencial Destructivo en función de PGA de Registros seleccionados desde Catálogo de terremotos de Jorquera (2014). ....	77
<b>Figura 5.2:</b> Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma para todos los tipos de suelos de la Norma NCh433, utilizando varios niveles de PGA. (a) Registros compatibilizados para un 5% de error con respecto al Target. (b) Registros compatibilizados para un 20% de error con respecto al Target. ....	78
<b>Figura 5.3:</b> Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma para todos los tipos de Suelos de la Norma NCh433. ....	79
<b>Figura 5.4:</b> Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma para Suelo tipo A y E. ....	79
<b>Figura 5.5:</b> Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma para cada tipo de Suelo. ....	81
<b>Figura 5.6:</b> Potencial Destructivo en función de PGA de Registros seleccionados específicos. .	82
<b>Figura 5.7:</b> Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma para registros específicos. ....	84
<b>Figura 5.8:</b> Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma para Suelos A y E. ....	85
<b>Figura 5.9:</b> Correlación entre Potencial Destructivo Horizontal Pdh e Intensidad MSK para los datos acelerográficos del terremoto El Maule, Chile 2010, y del terremoto de Valparaíso, Chile 1985. Los datos se comparan con la ecuación propuesta por Saragoni y otros (1989) (Ruiz y Saragoni, 2012). ....	86
<b>Figura 5.10:</b> Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma para todos los tipos de Suelos de la Norma NCh433, utilizando sus niveles de aceleración efectiva máxima. (a) Registros compatibilizados para un 5% de error con respecto al Target. (b) Registros compatibilizados para un 20% de error con respecto al Target. ....	87
<b>Figura 5.11:</b> Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma para todos los tipos de suelos de la Norma NCh433, utilizando sus niveles de aceleración efectiva máxima. ....	87
<b>Figura 5.12:</b> Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma para Suelo tipo A y E, utilizando sus niveles de aceleración efectiva máxima. ....	88
<b>Figura 5.13:</b> Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma para cada tipo de Suelo, utilizando sus niveles de aceleración efectiva máxima. ....	89

<b>Figura 5.14:</b> Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma para registros específicos, utilizando sus niveles de aceleración efectiva máxima.....	91
<b>Figura 5.15:</b> Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma y al espectro con dos Peaks, para todos los tipos de Suelos de la Norma NCh433. ....	92
<b>Figura 5.16:</b> Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma y al espectro con dos Peaks para Suelos tipo A y E de la Norma NCh433, para un 5% y 20% de error. ....	93
<b>Figura 5.17:</b> Espectros generados para suelo tipo A y E.....	94
<b>Figura 5.18:</b> Espectros generados para suelo tipo A con espectros igualados a partir de un período.....	95
<b>Figura 5.19:</b> Espectros generados para suelo tipo A con espectros igualados a partir de un período y gráficos de potencial destructivo en función del PGA de los registros compatibilizados a sus Targets respectivos. ....	95
<b>Figura 6.1:</b> Curva Fuerza – Deformación de material inelástico (Jorquera, 2014).....	97
<b>Figura 6.2:</b> Gráfico Fuerza – Deformación de modelo bilineal (Saavedra, 2005).....	98
<b>Figura 6.3:</b> Curva de histéresis aproximada de modelo bilineal (Saavedra, 2005).....	99
<b>Figura 6.4:</b> Oscilador de un grado de libertad (Jorquera, 2014). ....	102
<b>Figura 6.5:</b> Forma primer modo (Jorquera, 2014).....	105
<b>Figura 6.6:</b> Curva capacidad para un modelo de 20 pisos (Droguett, 2008).....	106
<b>Figura 7.1:</b> Curvas de Fragilidad para los registros compatibilizados al espectro de la Norma para cada tipo de Suelo de la Norma NCh433, utilizando varios niveles de PGA.....	112
<b>Figura 7.2:</b> Espectros de respuesta para 25 registros de base de datos compatibilizados al espectro de la Norma para un suelo tipo D, utilizando un PGA de 1.2g, con un 20% de error. .	113
<b>Figura 7.3:</b> Curvas de Fragilidad para los registros compatibilizados al espectro de la Norma y dos Peaks para cada tipo de Suelo de la Norma NCh433, utilizando varios niveles de PGA, para un 5% de error. ....	115
<b>Figura 7.4:</b> Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma y espectro con dos Peaks para Suelo tipo A. ....	116
<b>Figura 7.5:</b> Curvas de Fragilidad para los registros compatibilizados al espectro de la Norma para cada tipo de Suelo de la Norma NCh433, utilizando varios niveles de PGA considerando una razón de amortiguamiento de 2% y 5%.....	118
<b>Figura 7.6:</b> Curvas de Fragilidad para Set de terremotos y para todo el Catálogo (Jorquera, 2014).....	119
<b>Figura 7.7:</b> Comparación de Curvas de Fragilidad para Set de terremotos y para todo el Catálogo de Jorquera.....	120
<b>Figura 7.8:</b> Curvas de Fragilidad mediante registros compatibilizados para suelos B y E. ....	120

<b>Figura 7.9:</b> Estimación curvas de fragilidad para el espectro de la Norma y dos Peaks, para cada tipo de Suelo de la Norma NCh433, considerando un 5% de error. ....	124
<b>Figura 7.10:</b> Estimación de Curvas de Fragilidad para los registros compatibilizados al espectro de la Norma para cada tipo de Suelo, utilizando varios niveles de PGA considerando una razón de amortiguamiento de 2% y 5%. ....	127
<b>Figura 8.1:</b> Espectros generados para suelo tipo E.....	133
<b>Figura 8.2:</b> Espectros de Respuesta de registros compatibilizados para suelo tipo D y un margen de error de 5% y 20%, utilizando la aceleración efectiva máxima de la Norma $A_0=0.4g$ .....	134

# **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

A lo largo de su historia, Chile se ha caracterizado por ser un país con una elevada sismicidad. Esto se puede explicar principalmente por su ubicación en los límites de la placa de Nazca y Sudamericana. Debido a la alta velocidad de convergencia entre estas dos placas, la sismicidad en esa zona es la más intensa y produce los mayores terremotos en el país.

El estudio de las características y análisis de los sismos, son muy importantes para el desarrollo del país y del mundo entero, ya que estos eventos ocurren frecuentemente, por lo que las estructuras construidas en zonas de alta sismicidad, deben tener la capacidad de resistir los esfuerzos generados por las aceleraciones que se originan en el suelo. Un claro ejemplo, es el terremoto de magnitud Mw 8.8 en Chile, el 27 de febrero de 2010, donde muchas localidades fueron sometidas a demandas altas de aceleración. Teniendo en cuenta estas consideraciones, es importante realizar un buen diseño de las estructuras, y estudiar continuamente el efecto que producen los sismos en éstas.

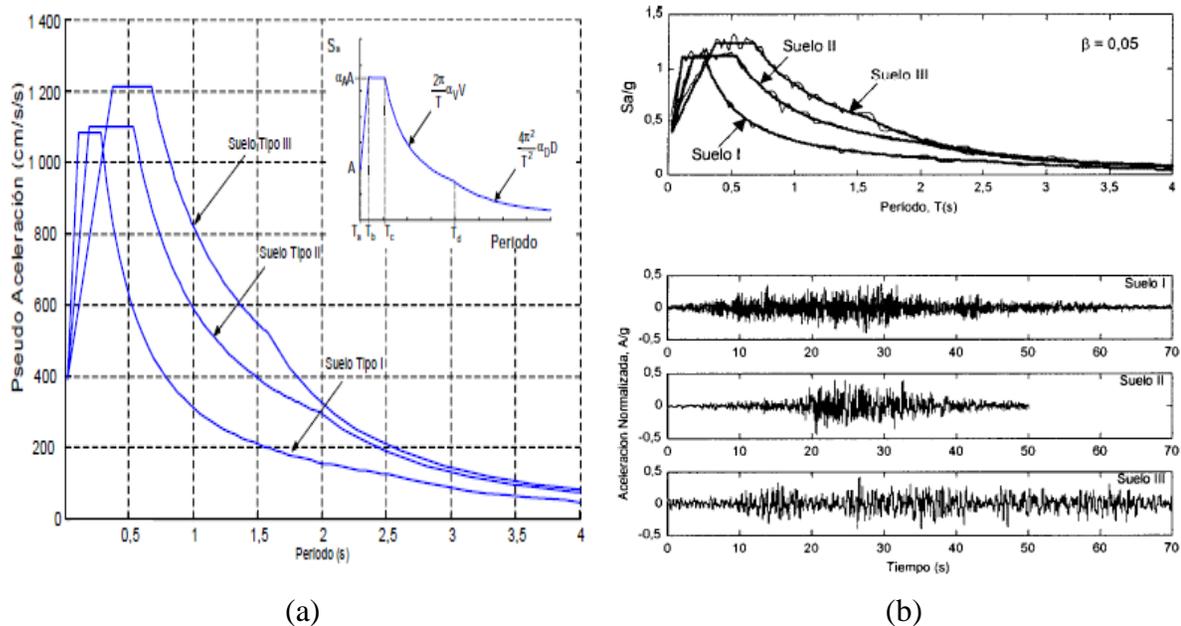
La acción de sismos sobre las estructuras, es materia de preocupación, por la magnitud de los daños, grandes pérdidas económicas, y lo más relevante, por el gran número de víctimas humanas que pueden ocasionar este tipo de eventos. Debido a lo anterior, es posible estudiar las características de los terremotos y cómo se ve afectado el suelo cuando ocurren éstos, a través de registros de aceleración. Durante un terremoto es posible registrar la aceleración que experimenta el suelo, lo que se plasma en un acelerograma, mediante instrumentos denominados acelerógrafos. A partir de dichos registros, es posible obtener los espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento.

## **1.1. ANTECEDENTES GENERALES**

El diseño sísmico de estructuras se realiza a partir de espectros de respuesta de aceleración que consideran la influencia de varios terremotos, es decir, representan una envolvente de los terremotos ocurridos en una zona y se obtienen mediante procedimientos estadísticos. Sin embargo, en muchas situaciones, al realizar el diseño de estructuras con aislación sísmica, instalaciones críticas y edificios altamente irregulares, la obtención de la respuesta estructural usando un espectro de respuesta elástico escalado, no es considerada apropiada para verificar su resistencia ante un terremoto. En tales casos, es necesario realizar un análisis dinámico no lineal de la estructura y el input sísmico necesita definirse a partir de registros de aceleración en el tiempo (serie de tiempo de aceleración), que generen espectros de respuesta compatibles con espectros de respuesta elástico que representen las acciones sísmicas de diseño en el sitio (para un tipo de suelo definido), o utilizando simulaciones numéricas a través de la generación de registros artificiales. El método comúnmente usado para que la modificación de la serie de tiempo sea consistente con el espectro de respuesta de diseño, es el método de

compatibilización de espectros, el cual involucra modificar el contenido de frecuencia de la serie de tiempo para compatibilizar el espectro de diseño en todos sus períodos (Hancock, 2006).

Un ejemplo en que se aplica la compatibilización de espectros, es en la Norma Chilena NCh 2745 Of. 2003, para el análisis y diseño de estructuras con aislación sísmica. En el capítulo de procedimiento de análisis dinámico (capítulo 8), punto 8.4.2 de Registros, se indica que se deben seleccionar pares de componentes horizontales de registros de aceleración del suelo de al menos tres eventos sísmicos. En los comentarios de la norma, es posible observar registros compatibles con los espectros de diseño de la norma de la Figura 1.1 (a), de tres registros artificiales para cada tipo de suelo (I, II y III), los cuales fueron generados a partir de las dos componentes horizontales de aceleración medidas en el sismo del 3 de marzo de 1985. Es importante destacar, que dicha norma es del año 2003. En la Figura 1.1 (b), es posible observar los registros artificiales compatibles con los espectros de diseño para una razón de amortiguamiento de 0.05 que se muestran en la norma, donde los registros son normalizados a una aceleración máxima del suelo de 0.4g.

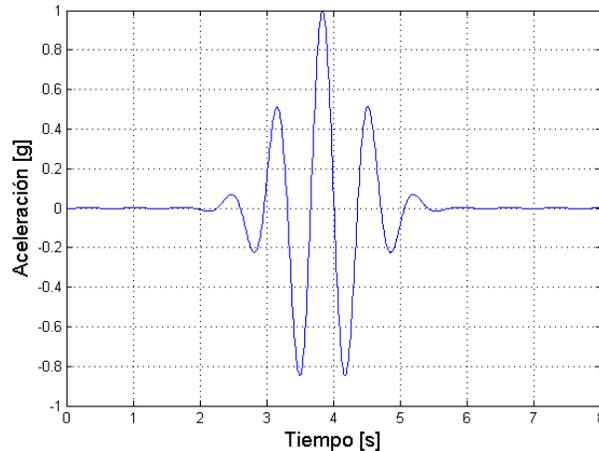


**Figura 1.1:** Registros compatibilizados a Norma NCh2745 of2003. (a) Espectro base de diseño para zona 2 y los tres tipos de suelo para  $\beta=0,05$ . (b) Registros sintéticos compatibles con los espectros de diseño de Figura 1.1 (a), para  $\beta=0,05$ .

Cuando se realizan análisis en el tiempo para un edificio con aisladores, disipadores sísmicos o incorporando sus propiedades no lineales, los registros utilizados deben ser compatibles con un espectro de respuesta de diseño. Para realizar esto, hay distintos métodos, entre los que está el método de Al Atik y Abrahamson (2010), que es uno de los más usados, el cual trabaja con wavelets a través de un modelo matemático de ondas.

La teoría de wavelets es una poderosa herramienta matemática desarrollada a fines del siglo XX que ha despertado gran atención en diversos campos de la ingeniería, física y las ciencias aplicadas, tales como el procesamiento de señales e imágenes, el reconocimiento de patrones, la física cuántica, el diagnóstico médico por imágenes, y un sinnúmero de aplicaciones (Vampa, 2011).

Las wavelets son funciones que tienen una forma de onda característica que es oscilante y suave, que permite hacer la descomposición de una señal en tiempo y frecuencia. Una wavelet es una onda pequeña cuya energía está concentrada en el tiempo y es una herramienta de suma importancia para el análisis de fenómenos transientes, no estacionarios o variantes en el tiempo. En la Figura 1.2 se muestra una wavelet, en donde se puede apreciar que su forma es irregular. Las características de las wavelets pueden variar y pueden ser asimétricas, sin embargo, están limitadas en dominio y lo más importante es que éstas pueden servir como base para el análisis y generación de señales invariantes en el tiempo o no estacionarias.



**Figura 1.2:** Representación de una wavelet.

La función wavelet que se utiliza en este trabajo es una herramienta matemática capaz de modificar señales no estacionarias como los registros de aceleración, de manera que su espectro de respuesta de aceleración sea compatible con un espectro específico o Target.

En este trabajo se aplica el método de Al Atik y Abrahamson (2010), para compatibilizar registros de terremotos chilenos con un espectro de diseño (considerando una razón de amortiguamiento de 5%), y se analizan los efectos de la compatibilización en las propiedades de los registros antes mencionados. Además una vez generados los registros compatibilizados se generan curvas de fragilidad para una estructura simple que representa las propiedades de edificios chilenos de hormigón armado.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo General**

Analizar y estudiar el efecto que tiene compatibilizar registros de terremotos reales con un espectro de diseño o Target, para diferentes tipos de suelos.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

Analizar la influencia de las propiedades y parámetros de los registros de terremotos chilenos (PGA, intensidad de Arias, intensidad de Housner, etc), en registros compatibilizados con un espectro de respuesta objetivo.

Comparar las propiedades de registros compatibilizados con las propiedades de los registros de terremotos chilenos, para ver cuánta distorsión ocasiona el proceso de compatibilización.

Generar una base de datos de registros compatibilizados, según tipos de suelos, que se pueden usar para la obtención de curvas de fragilidad para una estructura simple.

Generar curvas de fragilidad para una estructura simple que toma en cuenta las propiedades generales de los edificios chilenos de hormigón armado (período, resistencia máxima, etc), que sufrieron daño en el terremoto de magnitud Mw 8.8 del año 2010 en Chile.

## **1.3. ORGANIZACIÓN DEL INFORME**

El informe se encuentra dividido en nueve capítulos, los cuales se resumen a continuación:

### **1.3.1. Capítulo 1: Introducción**

Se presentan los antecedentes generales previos al presente trabajo y se indica tanto el objetivo general como los objetivos específicos.

### **1.3.2. Capítulo 2: Metodología**

Se describe la metodología empleada para poder implementar el programa de compatibilización espectral en el software Matlab, y se entrega un marco teórico el cual facilita realizar los cálculos posteriores que permiten realizar un mejor análisis de los resultados finales.

### **1.3.3. Capítulo 3: Estudio de Registros Compatibilizados**

Se realizan estudios preliminares con el programa de compatibilización espectral implementado en Matlab, mediante amplificaciones de registros compatibilizados a un Target. Además, Se hacen estudios más específicos con dicho programa a partir de registros obtenidos del terremoto del Maule del año 2010 en Concepción Centro y Concepción San Pedro.

### **1.3.4. Capítulo 4: Base de Datos de Registros Compatibilizados**

Se presentan los elementos necesarios para la realización de la base de datos de registros compatibilizados y se describen los espectros que se utilizan como Target.

### **1.3.5. Capítulo 5: Análisis de Base de Datos de Registros Compatibilizados**

Se analiza la base de datos de registros compatibilizados a través de gráficos en escala logarítmica de Potencial Destructivo en función del PGA de registros compatibilizados y de registros relevantes de terremotos chilenos, de manera de poder visualizar la dispersión de los datos. La compatibilización se realiza para un Target, considerando diferentes tipos de suelos, así como también para distintos márgenes de error (porcentaje (%)) de desajuste espectral entre el Target y el espectro del registro compatibilizado).

### **1.3.6. Capítulo 6: Análisis Dinámico No Lineal**

Se expone la metodología y marco teórico para poder realizar un análisis dinámico no lineal al modelo estructural simplificado a utilizar, el cual representa a edificios chilenos típicos construidos en Chile.

### **1.3.7. Capítulo 7: Curvas de Fragilidad**

Se explica y se desarrolla el concepto de las curvas de fragilidad, las cuales se generan a partir de la base de datos de registros compatibilizados, mediante la obtención de la respuesta del modelo estructural que se utiliza en este trabajo.

### **1.3.8. Capítulo 8: Conclusiones**

Se resumen los resultados más importantes de la investigación y se enuncian las conclusiones de mayor relevancia de este trabajo de memoria de título. Además, se presentan limitaciones del trabajo e investigaciones futuras que se puedan realizar a partir de éste.

# CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA PARA LA COMPATIBILIZACIÓN ESPECTRAL

A continuación se describe la metodología empleada en este trabajo, es decir, como se calculan los espectros de respuesta, el método que se utiliza para la compatibilización espectral, los parámetros sísmicos y los espectros que se utilizan como Target. En cada sección se entrega un marco teórico que respalda cada metodología, las cuales se programan en el software Matlab.

## 2.1. CÁLCULO DE ESPECTRO DE RESPUESTA

Para la estimación numérica de espectros de respuesta a partir de registros de terremotos, se utiliza un método basado en la solución exacta que rige la ecuación diferencial para sucesivos segmentos lineales de la excitación y estimando la respuesta en intervalos de tiempo discretos (Nigam y Jennings, 1969). El método tiene gran precisión con respecto a otros métodos utilizados para el cálculo de espectros de respuesta, al no introducir aproximaciones numéricas en la integración.

En este método se requiere conocer sólo la aceleración del suelo ( $a(t)$ ), la razón de amortiguamiento ( $\beta$ ), un delta de tiempo ( $dt = 1/Fs$ , donde  $Fs$  es la tasa de muestreo), condiciones iniciales y la frecuencia natural que se desee ( $\omega$ ), por lo que las variables necesarias para el cálculo de espectros son mínimas.

La formulación del método para el cálculo de espectros de respuesta se explica a continuación:

Los espectros son definidos como la máxima respuesta de un oscilador simple sometido a la aceleración de la base  $a(t)$ , tal como se muestra en la Figura 2.1. La ecuación de movimiento del oscilador es:

$$\ddot{x} + 2\beta\omega\dot{x} + \omega^2x = -a(t) \quad (2.1)$$

Asumiendo que la aceleración  $a(t)$  puede ser aproximada mediante una función segmentada linealmente como se puede observar en la Figura 2.2, la ecuación (2.1) para el intervalo  $t_i \leq t \leq t_{i+1}$ , se puede escribir como:

$$\ddot{x} + 2\beta\omega\dot{x} + \omega^2x = -a_i - \frac{\Delta a_i}{\Delta t_i}(t - t_i) \quad (2.2)$$

Donde:

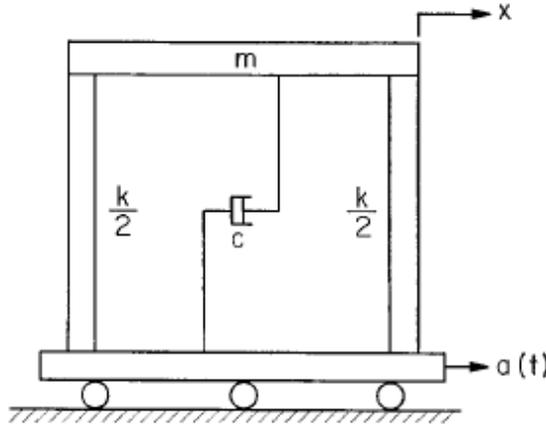
$$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i \text{ y } \Delta a_i = a_{i+1} - a_i \quad (2.3)$$

Para obtener las ecuaciones en forma simplificada y ordenada se considera la definición:

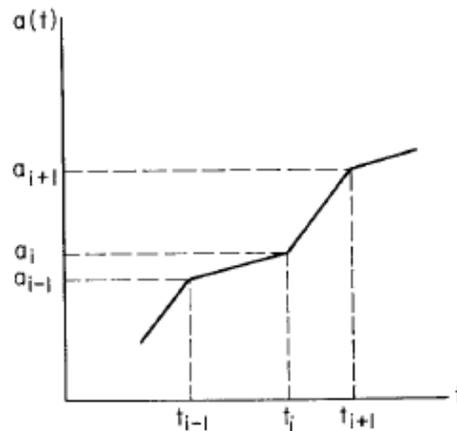
$$\omega_d = \omega \sqrt{1 - \beta^2} \quad (2.4)$$

Para el intervalo  $t_i \leq t \leq t_{i+1}$ , la solución de la ecuación (2.2) está dada por:

$$x = e^{-\beta\omega(t-t_i)} [C_1 \sin \omega_d(t-t_i) + C_2 \cos \omega_d(t-t_i)] - \frac{a_i}{\omega^2} + \frac{2\beta}{\omega^3} \frac{\Delta a_i}{\Delta t_i} - \frac{1}{\omega^2} \frac{\Delta a_i}{\Delta t_i} (t-t_i) \quad (2.5)$$



**Figura 2.1:** Representación de un oscilador simple (Nigam y Jennings, 1969).



**Figura 2.2:** Aceleración de la base idealizada (Nigam y Jennings, 1969).

Donde  $C_1$  y  $C_2$  son constantes de integración que se pueden encontrar evaluando la ecuación (2.5), para  $x = x_i$  y  $\dot{x} = \dot{x}_i$  en  $t = t_i$ , y tienen la forma:

$$C_1 = \frac{1}{\omega_d} \left( \beta \omega x_i + \dot{x}_i - \frac{2\beta^2 - 1}{\omega^2} \frac{\Delta a_i}{\Delta t_i} + \frac{\beta}{\omega} a_i \right) \quad (2.6a)$$

$$C_2 = x_i - \frac{2\beta}{\omega^3} \frac{\Delta a_i}{\Delta t_i} + \frac{a_i}{\omega^2} \quad (2.6b)$$

Sustituyendo los valores de  $C_1$  y  $C_2$  en la ecuación (2.5), se puede obtener iterando  $x$  y  $\dot{x}$  en  $t = t_{i+1}$  dados por la siguiente ecuación:

$$\bar{x}_{i+1} = A(\beta, \omega, \Delta t_i) \bar{x}_i + B(\beta, \omega, \Delta t_i) \bar{a}_i \quad (2.7a)$$

Donde:

$$\bar{x}_i = \begin{Bmatrix} x_i \\ \dot{x}_i \end{Bmatrix} \quad \bar{a}_i = \begin{Bmatrix} a_i \\ a_{i+1} \end{Bmatrix} \quad (2.7b)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \quad (2.7c)$$

Teniendo en consideración la ecuación (2.4), los elementos de las Matrices  $A$  y  $B$  están dados por las siguientes expresiones:

$$a_{11} = e^{-\beta\omega\Delta t_i} \left( \frac{\beta\omega}{\omega_d} \sin \omega_d \Delta t_i + \cos \omega_d \Delta t_i \right) \quad (2.7d-1)$$

$$a_{12} = \frac{e^{-\beta\omega\Delta t_i}}{\omega_d} \sin \omega_d \Delta t_i \quad (2.7d-2)$$

$$a_{21} = -\frac{\omega^2}{\omega_d} e^{-\beta\omega\Delta t_i} \sin \omega_d \Delta t_i \quad (2.7d-3)$$

$$a_{22} = e^{-\beta\omega\Delta t_i} \left( \cos \omega_d \Delta t_i - \frac{\beta\omega}{\omega_d} \sin \omega_d \Delta t_i \right) \quad (2.7d-4)$$

$$b_{11} = e^{-\beta\omega\Delta t_i} \left[ \left( \frac{2\beta^2 - 1}{\omega^2\Delta t_i} + \frac{\beta}{\omega} \right) \frac{\sin \omega_d \Delta t_i}{\omega_d} + \left( \frac{2\beta}{\omega^3\Delta t_i} + \frac{1}{\omega^2} \right) \cos \omega_d \Delta t_i \right] - \frac{2\beta}{\omega^3\Delta t_i} \quad (2.7e-1)$$

$$b_{12} = -e^{-\beta\omega\Delta t_i} \left[ \left( \frac{2\beta^2 - 1}{\omega^2\Delta t_i} \right) \frac{\sin \omega_d \Delta t_i}{\omega_d} + \frac{2\beta}{\omega^3\Delta t_i} \cos \omega_d \Delta t_i \right] - \frac{1}{\omega^2} + \frac{2\beta}{\omega^3\Delta t_i} \quad (2.7e-2)$$

$$b_{21} = e^{-\beta\omega\Delta t_i} \left( \frac{2\beta^2 - 1}{\omega^2\Delta t_i} + \frac{\beta}{\omega} \right) \left( \cos \omega_d \Delta t_i - \frac{\beta\omega}{\omega_d} \sin \omega_d \Delta t_i \right) - e^{-\beta\omega\Delta t_i} \left( \frac{2\beta}{\omega^3\Delta t_i} + \frac{1}{\omega^2} \right) (\omega_d \sin \omega_d \Delta t_i + \beta\omega \cos \omega_d \Delta t_i) + \frac{1}{\omega^2\Delta t_i} \quad (2.7e-3)$$

$$b_{22} = -e^{-\beta\omega\Delta t_i} \frac{2\beta^2 - 1}{\omega^2\Delta t_i} \left( \cos \omega_d \Delta t_i - \frac{\beta\omega}{\omega_d} \sin \omega_d \Delta t_i \right) + e^{-\beta\omega\Delta t_i} \frac{2\beta}{\omega^3\Delta t_i} (\omega_d \sin \omega_d \Delta t_i + \beta\omega \cos \omega_d \Delta t_i) - \frac{1}{\omega^2\Delta t_i} \quad (2.7e-4)$$

A partir de la ecuación (2.2), es posible obtener la aceleración absoluta  $\ddot{z}$  de la masa en el tiempo  $t_i$ , la cual está dada por la siguiente ecuación:

$$\ddot{z}_i = \ddot{x}_i + a_i = - \left( 2\beta\omega\dot{x}_i + \omega^2 x_i \right) \quad (2.8)$$

Para el cálculo de espectros de respuesta de desplazamiento ( $S_d$ ), velocidad ( $S_v$ ) y aceleración ( $S_a$ ), se requiere encontrar el máximo valor de desplazamiento, velocidad y aceleración durante una excitación dada. Esto se realiza mediante la estimación de la respuesta en intervalos de tiempo discretos a través de las ecuaciones (2.7) y (2.8) y controlando los parámetros de la respuesta para conservar el valor máximo. A continuación se presentan la obtención de los espectros de respuesta, donde  $N$  es el número de puntos discretos en que la respuesta es obtenida.

$$S_d(\omega, \beta) = \text{Max}_{i=1,N} [x_i(\omega, \beta)] \quad (2.9)$$

$$S_v(\omega, \beta) = \text{Max}_{i=1,N} [\dot{x}_i(\omega, \beta)] \quad (2.10)$$

$$S_a(\omega, \beta) = \text{Max}_{i=1,N} [\ddot{z}_i(\omega, \beta)] \quad (2.11)$$

## 2.2. MÉTODO DE COMPATIBILIZACIÓN ESPECTRAL

El enfoque utilizado para realizar la compatibilización de espectros se basa en un método en el dominio del tiempo que adiciona wavelets a la serie de tiempo inicial. Lilhanand y Tseng (1988), generan espectros compatibles con múltiples valores de amortiguamiento utilizando un algoritmo de ajuste de wavelets, el cual modifica la serie de tiempo inicial, tal que su espectro de respuesta es compatible con el espectro de diseño, asegurando estabilidad numérica. Dicho método supone que el tiempo de la respuesta peak no cambia como resultado del ajuste wavelet. Tomando en cuenta la serie de tiempo de aceleración inicial como  $a(t)$ , ésta se debe modificar de tal forma que su espectro de respuesta estimado sea compatible con un espectro objetivo, a través de todo el rango de frecuencias, manteniendo reales las series de tiempo de velocidad y desplazamiento.

La diferencia entre la serie de tiempo espectral y el espectro objetivo (desajuste espectral) para una determinada frecuencia ( $\omega_i$ ) y razón de amortiguamiento ( $\beta_i$ ), se puede expresar como:

$$\Delta R_i = (Q_i - R_i) \cdot P_i \quad (2.12)$$

Donde  $Q_i$  es el valor del espectro objetivo,  $R_i$  es el valor del espectro de respuesta para la serie de tiempo, y  $P_i$  es la polaridad de la respuesta peak del oscilador. La polaridad  $P_i$  es igual a 1 si la máxima respuesta del oscilador es positiva, y  $P_i$  es igual a -1 si la máxima respuesta del oscilador es negativa.

Aceptando que el tiempo  $t_i$  de la respuesta peak del oscilador no será perturbada mediante la adición de un pequeño ajuste a  $a(t)$ , se determina un ajuste para la serie de tiempo  $\delta a(t)$ , tal que la respuesta del oscilador de  $\delta a(t)$  en el tiempo  $t_i$  sea igual a  $\Delta R_i$  para todo  $i$ .  $\delta a(t)$  se puede escribir como:

$$\delta a(t) = \sum_{j=1}^N b_j f_j(t) \quad (2.13)$$

Donde  $f_j(t)$  es una serie de funciones de ajuste,  $b_j$  es el conjunto de amplitudes de las funciones de ajuste que se deben determinar, y  $N$  es el número total de puntos para compatibilizar los espectros. La respuesta de la aceleración de  $\delta a(t)$  para una frecuencia ( $\omega_i$ ) y razón de amortiguamiento ( $\beta_i$ ) en el tiempo  $t_i$  está dado por:

$$\delta R_i = \int_0^{t_i} \delta a(\tau) h_i(t_i - \tau) d\tau \quad (2.14)$$

Donde  $h_i(t)$  es la función de respuesta al impulso de aceleración para un oscilador de un grado de libertad con frecuencia ( $\omega_i$ ) y razón de amortiguamiento ( $\beta_i$ ), y  $\tau$  es el parámetro de tiempo de integración. Reemplazando la ecuación (2.13) en la ecuación (2.14) se tiene que:

$$\delta R_i = \sum_{j=1}^N b_j \int_0^{t_i} f_j(\tau) h_i(t_i - \tau) d\tau \quad (2.15)$$

La función de respuesta al impulso de aceleración se puede expresar como:

$$h_i(t) = \frac{-\omega_i}{\sqrt{1-\beta_i^2}} \exp(-\omega_i \beta_i t) [(2\beta_i^2 - 1) \sin(\omega_i' t) - 2\beta_i \sqrt{1-\beta_i^2} \cos(\omega_i' t)] \quad (2.16)$$

Donde  $h_i(t) = 0$  para  $t < 0$  y

$$\omega_i' = \omega_i \sqrt{1-\beta_i^2} \quad (2.17)$$

Definiendo  $c_{ij}$  como la respuesta en el tiempo  $t_i$  para la  $i^{\text{th}}$  frecuencia y razón de amortiguamiento resultante de la función de ajuste  $f_j(t)$ , se tiene:

$$c_{ij} = \int_0^{t_i} f_j(\tau) h_i(t_i - \tau) d\tau \quad (2.18)$$

Sustituyendo la ecuación (2.18) en la ecuación (2.15) se obtiene:

$$\delta R_i = \sum_{j=1}^N b_j c_{ij} \quad (2.19)$$

Si se considera la serie de tiempo de ajuste  $\delta R_i$  igual a  $\Delta R_i$  entonces:

$$\Delta R_i = \sum_{j=1}^N b_j c_{ij} \quad (2.20)$$

La amplitud de cada wavelet usada en el ajuste se determina mediante la siguiente expresión:

$$b = C^{-1} \delta R \quad (2.21)$$

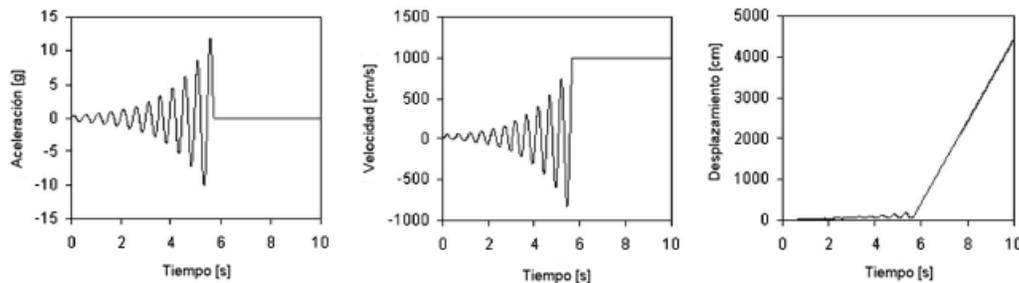
Donde  $C$  es una matriz cuadrada cuyos elementos describen la amplitud de cada respuesta de un sistema de un grado de libertad, bajo la acción de cada wavelet, en un tiempo en que la respuesta necesita ser ajustada.

Para un  $b_j$  dado, el ajuste de la serie de tiempo  $a(t)$ , puede estimarse a partir de la ecuación (2.13). La nueva serie de tiempo ajustada para la primera iteración se puede calcular mediante:

$$a_1(t) = a(t) + \gamma \delta a(t) \quad (2.22)$$

Donde  $\gamma$  es un parámetro de relajación entre 0 y 1, que sirve para amortiguar el ajuste. Ya en la segunda iteración, el algoritmo se repite usando la serie de tiempo ajustada  $a_1(t)$  en lugar de  $a(t)$ . Se puede seguir iterando hasta obtener la precisión que se desee para lograr la compatibilización de los espectros.

El algoritmo anteriormente descrito, usa un ajuste de wavelet que asegura estabilidad numérica en el dominio de tiempo, sin embargo, su función de ajuste ( $f_j(t) = h_j(t_j - t)$ ) no preserva el carácter no estacionario de la serie de tiempo inicial de aceleración e introduce una deriva (drift) en la serie de tiempo de velocidad y desplazamiento como se puede observar en la Figura 2.3.



**Figura 2.3:** Serie de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento mediante el algoritmo de Lilhanand y Tseng (1988).

Abrahamson (1992), desarrolló el programa RspMatch para implementar el algoritmo de Lilhanand y Tseng (1988), y propuso un nuevo ajuste de wavelet que preserva el carácter no estacionario del movimiento del suelo al ser sometido a un sismo, asegurando estabilidad y eficiencia de la solución numérica. Sin embargo, este ajuste de wavelet planteado, tampoco deja la velocidad y desplazamiento final en cero, y produce deriva en los resultados de la serie de tiempo de velocidad y desplazamiento.

Al Atik y Abrahamson (2010), desarrollan una nueva versión de RspMatch y proponen una nueva función de ajuste que permite el uso de una solución analítica en el método de compatibilización de espectros y que fácilmente deja en cero la velocidad y desplazamiento, proporcionando una solución estable y eficiente en el tiempo, sin introducir drift a los resultados de las series de tiempo de velocidad y desplazamiento. El programa también permite

compatibilizar registros a espectros de respuesta de pseudo-aceleración, asegurando estabilidad y convergencia de la solución.

La función de ajuste considerada por Al Atik y Abrahamson (2010), consiste en una función “Tapered Cosine” con una función Gaussiana, la cual permite que los elementos de la matriz C dada por la ecuación (2.18) sean determinados analíticamente, asegurando estabilidad y eficiencia de la solución. La mejorada wavelet considerada por Al Atik y Abrahamson (2010) puede ser descrita por:

$$f_j(t) = \cos\left[\omega_j(t-t_j + \Delta t)\right] \exp\left[-\left(\frac{t-t_j + \Delta t}{\alpha_j}\right)^2\right] \quad (2.23)$$

Donde:

$f_j(t)$ : es la amplitud de la  $j^{th}$  wavelet en el tiempo t.

$t_j$ : es el tiempo de la respuesta máxima del  $j^{th}$  oscilador bajo la acción de la  $j^{th}$  wavelet.

$\omega_j$ : es la frecuencia amortiguada de la  $j^{th}$  wavelet, definida en la ecuación (2.17).

$\Delta t_j$ : es la diferencia de tiempo.

$\alpha_j$ : es un coeficiente.

$\Delta t_j$  es la diferencia entre el tiempo de la respuesta máxima  $t_j$  y el origen de la referencia de la wavelet.  $\Delta t_j$  está dado por:

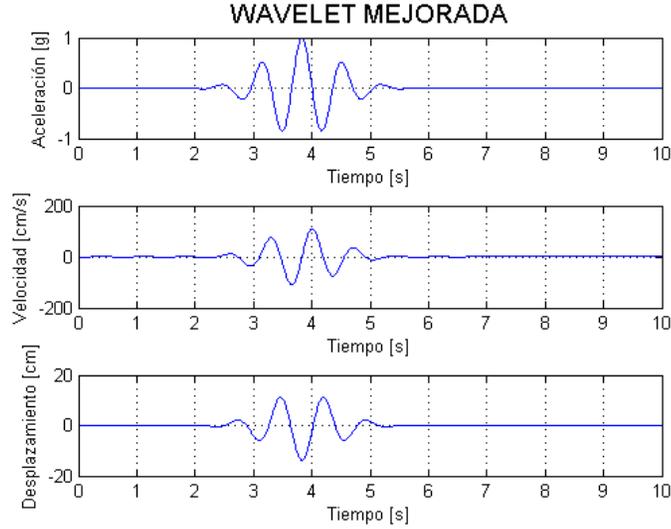
$$\Delta t_j = \frac{\tan^{-1}\left[\frac{\sqrt{1-\beta_j^2}}{\beta_j}\right]}{\omega_j} \quad (2.24)$$

$\alpha_j$  es un coeficiente que depende de la frecuencia usado para ajustar la duración de la función de ajuste.  $\alpha(f)$  fue incluido para asegurar un taper suave durante varios ciclos en la función de ajuste y por lo tanto, reduce a cero la velocidad y el desplazamiento para todas las frecuencias.  $\alpha(f)$  está dado por:

$$\alpha(f) = 1.178 f^{-0.93} \quad (2.25)$$

Donde  $f = \frac{\omega_j}{2\pi}$  (Frecuencia en Hertz).

En la Figura 2.4, es posible observar las series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento de la función propuesta por Al Atik y Abrahamson (2010), en donde las series de tiempo de velocidad y desplazamiento obtenidas a partir de la integración de la aceleración terminan con valor nulo, y no aparece deriva en dichas series.



**Figura 2.4:** Series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento de wavelet considerada por Al Atik y Abrahamson (2010).

### 2.2.1. Cálculo de Matriz “C”

En la ecuación (2.18) se define cada componente  $c_{ij}$  de la matriz  $C$ , como la respuesta en el tiempo  $t_i$  para la  $i^{th}$  frecuencia y razón de amortiguamiento resultante de la función de ajuste  $f_j(t)$ :

$$c_{ij} = \int_0^{t_i} f_j(\tau) h_i(t_i - \tau) d\tau \quad (2.26)$$

Como se menciona anteriormente, Al Atik y Abrahamson (2010) definen la función de ajuste  $f_j(t)$  como:

$$f_j(t) = \cos[\omega_j(t - t_j + \Delta t)] \exp\left[-\left(\frac{t - t_j + \Delta t}{\alpha_j}\right)^2\right] \quad (2.27)$$

Además, Al Atik y Abrahamson (2010) definen la función de respuesta a un impulso de pseudo-aceleración en vez de la función de respuesta a un impulso de aceleración definida en la ecuación (2.16) en el algoritmo propuesto por Lilhanand y Tseng (1988). Por lo tanto, la función de

respuesta a un impulso de pseudo-aceleración usada para determinar la respuesta de aceleración del ajuste  $\delta a(t)$  está dada por:

$$h_i(t) = \frac{-\omega_i}{\sqrt{1-\beta_i^2}} \exp(-\omega_i \beta_i t) \sin(\omega_i t) \quad (2.28)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.27) y (2.28) en la ecuación (2.26), es posible determinar cada componente  $c_{ij}$  de la matriz  $C$ :

$$c_{ij} = \int_0^{t_i} \cos[\omega_j (\tau - t_j + \Delta t)] \exp\left[-\left(\frac{\tau - t_j + \Delta t_j}{\alpha_j}\right)^2\right] \cdot \frac{-\omega_i}{\sqrt{1-\beta_i^2}} \exp(-\omega_i \beta_i (t_i - \tau)) \sin(\omega_i (t_i - \tau)) d\tau \quad (2.29)$$

Según Al Atik y Abrahamson (2010), la razón del uso de la función de respuesta a un impulso de pseudo-aceleración en vez de la función de respuesta a un impulso de aceleración se debe principalmente porque es requerido para el diseño basado en el desplazamiento, así como también para el diseño de estructuras de períodos altos.

### 2.2.2. Padding dinámico de la serie de tiempo de aceleración

Para prevenir una deriva en diferentes frecuencias, Al Atik y Abrahamson (2010) definen un valor de  $t_j$  mínimo, ya que a pesar de que el coeficiente dependiente de la frecuencia  $\alpha_j$ , fue seleccionado para asegurar que no ocurra deriva en las series de tiempo de velocidad y desplazamiento de la wavelet, para valores menores al  $t_j$  mínimo en diferentes frecuencias, es posible que sí ocurra deriva. El mínimo valor de  $t_j$  está dado por:

$$t_{\min} = 18.54 \cdot (\omega^{-0.84}) \quad (2.30)$$

Donde  $\omega = 2\pi f$ , es la frecuencia angular.

### 2.2.3. Desajuste espectral

El método para la compatibilización espectral chequea la divergencia, usando el máximo desajuste espectral, el cual se define como el más grande desajuste calculado de todos los períodos para ser compatibilizados. El porcentaje (%) de desajuste espectral en el período espectral  $T$  ( $Misfit(T)$ ), se define como:

$$Misfit(T) = \left| \frac{SA(T) - SA_{target}(T)}{SA_{target}(T)} \right| \cdot 100 \quad (2.31)$$

Donde:

$SA(T)$ : Espectro de aceleración del registro ajustado en cada iteración en el período  $T$ .

$SA_{target}(T)$ : Espectro de aceleración del target (espectro de diseño).

#### 2.2.4. Metodología para realizar la compatibilización espectral

El método propuesto por Lilhanand y Tseng (1988), emplea wavelets, sin embargo, éste utiliza la respuesta de sistemas elásticos de un grado de libertad.

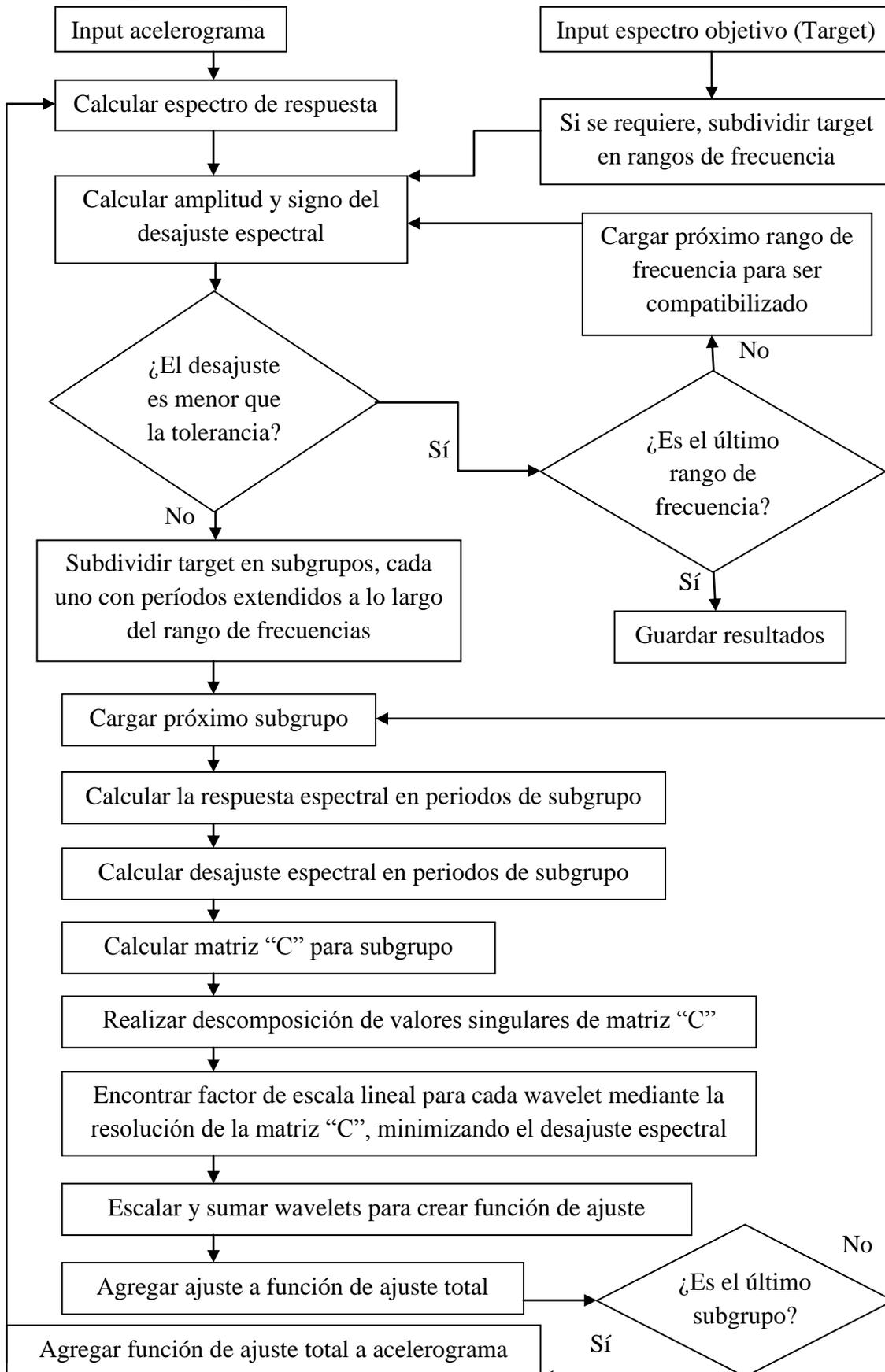
La metodología para realizar la compatibilización espectral se puede resumir como:

1. Calcular la respuesta de un sistema elástico de un grado de libertad bajo la acción de la serie de tiempo de aceleración para cada período y razón de amortiguamiento para ser compatibilizado.
2. Comparar el peak de cada respuesta de un grado de libertad con la amplitud del target (espectro objetivo) y determinar el desajuste espectral.
3. Agregar wavelets a la serie de tiempo de aceleración con las amplitudes y fases apropiadas de manera que el peak de cada respuesta coincida con la amplitud del target. Una wavelet es usada para compatibilizar una respuesta de un oscilador de un grado de libertad.

Cada wavelet es aplicada a la serie de tiempo de aceleración, de manera que el tiempo de la máxima respuesta de un grado de libertad bajo la acción de la wavelet es el mismo que el tiempo de la respuesta máxima para ser ajustada desde la serie de tiempo de aceleración no ajustada. Como se mencionó anteriormente, el método supone que el tiempo de la respuesta máxima no cambia como resultado de agregar el ajuste wavelet. Una explicación más detallada de la metodología para realizar la compatibilización espectral y un Manual para el programa implementado en Matlab se presentan en anexos (ANEXO A.1 y ANEXO A.2, respectivamente).

Un diagrama de Flujo que presenta el procedimiento de la compatibilización espectral empleado en una versión anterior de RspMatch es presentado en Hancock et al. (2006), el cual se muestra en la Figura 2.5. La metodología empleada en dicho diagrama es similar al utilizado en este trabajo.

**Figura 2.5:** Diagrama de Flujo del procedimiento del método de compatibilización espectral.



## 2.4. DESTRUCTIVIDAD SÍSMICA

Después de que ocurre un terremoto, lo más importante es determinar su destructividad, por la pérdida de vidas y el costo económico que ello conlleva. El objetivo principal de la ingeniería sísmica es reducir sus efectos, sin embargo, una de las preguntas más difíciles de contestar, es qué es lo que hace un terremoto destructivo.

Según Saragoni (1993), la destructividad de un terremoto es posible definirla como la capacidad de éste de producir daño, lo cual se traduce en fallas o puesta fuera de servicio de estructuras tales como edificios, embalses, puentes o en fallas de suelos como asentamientos, deslizamientos o licuaciones.

Los primeros instrumentos para la medición de la destructividad, fueron las escalas de intensidad sísmica, que se propusieron durante la segunda mitad del siglo XIX, constituyendo un primer intento de cuantificación, basándose en la apreciación de los daños ocurridos en las estructuras, suelo, reacción de las personas, etc, al producirse el movimiento del suelo ocasionado por el terremoto en una zona. Entre las escalas de intensidad que se destacan, está la escala de Mercalli modificada, la escala Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK) y la escala Macrosísmica Europea (EMS).

Con la construcción de los acelerógrafos en 1930, se intentó medir las intensidades instrumentalmente empleando el acelerograma, o los espectros de respuesta.

### 2.4.1. Intensidad de Housner

El primer intento en este sentido lo constituye la Intensidad de Housner (1952), el cual se define como el área encerrada bajo la curva del espectro de respuesta de velocidades, considerando una familia de osciladores de 1 grado de libertad uniformemente distribuido entre los periodos 0.1seg y 2.5seg para una razón de amortiguamiento dado. Este criterio considera definir la destructividad a partir de estructuras elásticas sin daño. Entonces, la intensidad de Housner ( $I_H$ ) queda definida por:

$$I_H = \int_{0.1}^{2.5} S_v(T, \beta = 20\%) dT \quad (2.32)$$

Donde:

$S_v$  : Espectro de velocidades.

$T$  : Período no amortiguado de la estructura de un grado de libertad.

$\beta$  : Razón de amortiguamiento (20% para el caso de este trabajo).

## 2.4.2. Intensidad de Arias

Arias (1970), cambia la Intensidad de Housner (manteniendo su criterio), por la Intensidad de Arias ( $I_A$ ), la cual es una medida de capacidad de daño basada en la energía del movimiento del suelo y representa la suma de energía disipada por unidad de peso por una familia de osciladores amortiguados de un grado de libertad cuyas frecuencias están uniformemente distribuidas en todo el rango de frecuencias, entre 0 e infinito.

La Intensidad de Arias es una medida de la energía del terremoto y su expresión se puede definir como:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_f} a^2(t) dt \quad (2.33)$$

Donde:

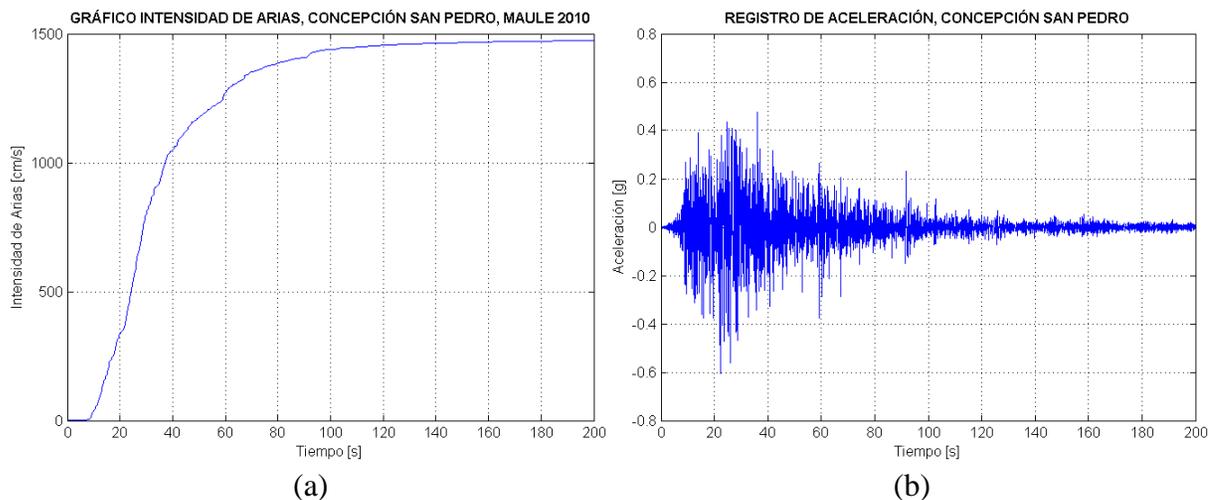
$t$ : Variable temporal.

$g$ : Aceleración de gravedad.

$a(t)$ : Aceleración del suelo durante el terremoto.

$t_f$ : Duración total del terremoto.

La Figura 2.6 muestra el gráfico de Intensidad de Arias en el tiempo para el registro de aceleración de Concepción San Pedro, obtenido del terremoto del Maule del año 2010 en Chile. En dicha figura es posible identificar la zona de movimiento fuerte en que la Intensidad de Arias crece abruptamente, sin embargo, para zonas del registro donde se observa un bajo valor de aceleración, la Intensidad de Arias permanece constante.



**Figura 2.6:** Gráfico de intensidad de Arias en el tiempo para registro de Concepción San Pedro.

### 2.4.3. Potencial Destructivo

Araya y Saragoni (1984), definen el Potencial Destructivo ( $P_D$ ) de un acelerograma, diferenciándose de los anteriores, en que se cambia el oscilador elástico por un oscilador elasto-plástico simple, que a través de sus incursiones no lineales, mide la capacidad de producir daño de los terremotos, considerando tres parámetros que caracterizan el movimiento sísmico: la aceleración máxima del suelo, la duración del movimiento fuerte y el contenido de frecuencia característica del registro de aceleraciones mediante la intensidad de cruces por cero, la cual se calcula a partir de dicho registro, contabilizando la cantidad total de cruces por cero dividido por el tiempo total transcurrido. La expresión del Potencial Destructivo se define como:

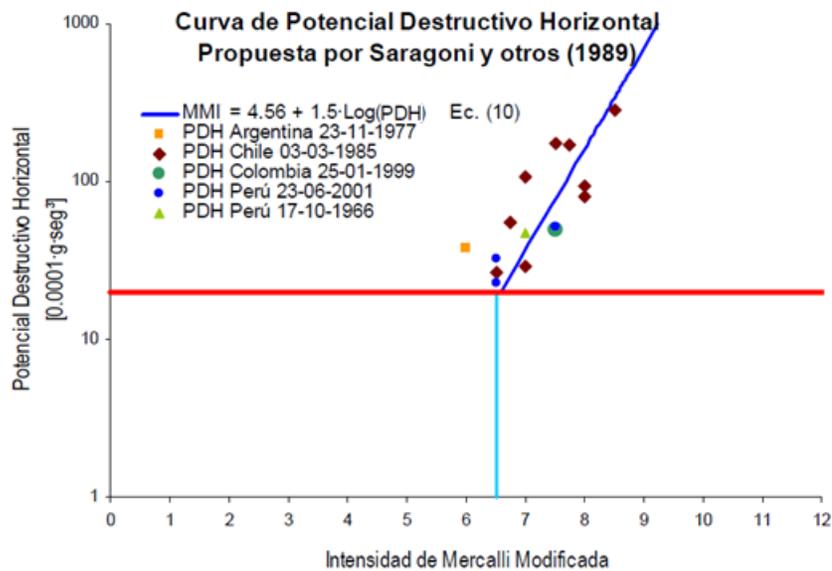
$$P_D = \frac{I_A}{V_0^2} \quad (2.34)$$

Donde:

$I_A$  : Intensidad de Arias.

$V_0$  : Intensidad de cruces por cero por segundo del registro de aceleraciones.

Diversos estudios e investigaciones han demostrado que este parámetro está bien correlacionado con los daños observados y con las intensidades macrosísmicas equivalentes. Tal correlación se puede evidenciar en el trabajo de Saragoni, Holmberg y Saéz (1989), donde se establece una correlación entre el Potencial Destructivo y la Intensidad de Mercalli Modificada, la cual se puede apreciar gráficamente en la Figura 2.7, donde se observa la curva que relaciona valores de Potencial Destructivo para ciertos grados de daño producido por terremotos destructivos sudamericanos.



**Figura 2.7:** Potencial Destructivo versus Intensidad de Mercalli Modificada (Saragoni et al, 1989).

## 2.5. ESPECTRO DE DISEÑO DE NORMA CHILENA NCH433

La norma Chilena NCh 433 Of. 96 de diseño sísmico de edificios, utiliza un espectro de diseño de aceleración que determina la resistencia sísmica de una estructura, el cual está definido por:

$$Sa = \frac{S \cdot A_0 \cdot \alpha}{(R^* / I)} \quad (2.35)$$

Donde:

$I$  : Coeficiente asociado a la importancia y uso del edificio.

$S$  : Parámetro dependiente del tipo de suelo.

$A_0$  : Aceleración efectiva máxima, que es determinada de acuerdo a la zona sísmica.

$R^*$  : Factor de reducción, que está en función de los períodos de la estructura y el suelo.

$\alpha$  : Función de amplificación dinámica.

La función de amplificación dinámica  $\alpha$  se determina para cada modo de vibrar  $n$  y tiene la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{1 + 4.5 \left( \frac{T_n}{T_0} \right)^P}{1 + \left( \frac{T_n}{T_0} \right)^3} \quad (2.36)$$

Donde:

$T_n$  : Período de vibración del modo  $n$  .

$T_0$  y  $P$  : Parámetros relativos al tipo de suelo de fundación.

En este trabajo, se utiliza el espectro de diseño elástico de la Norma Chilena NCh 433 Of. 96 (NCh433) como espectro objetivo o Target, el cual se puede escribir como:

$$Sa = S \cdot A_0 \cdot \alpha \quad (2.37)$$

### 2.5.1. Tipos de suelos

Luego de haber ocurrido el terremoto del Maule del 2010 en Chile, donde se evidenciaron grandes fallas estructurales en edificios y otros tipos de estructuras debido al comportamiento

sísmico del suelo, se realiza una nueva clasificación de los tipos de suelos que estaban especificados en la norma NCh 433 Of. 96 antes de dicho terremoto. La nueva clasificación sísmica del terreno se hace oficial en el Decreto Supremo N°61 (DS N°61), en el cual se considera un nuevo tipo de suelo intermedio a los ya existentes (suelo tipo C). En la Tabla 2.1 se identifican los tipos de suelos considerados en el decreto antes mencionado y que se utilizan en este trabajo, con una breve descripción de cada uno.

Tabla 2.1: Tipos de suelos de fundación de Norma NCh 433 Of. 96 con DS N°61.

Tipo de Suelo	Descripción
A	Roca, suelo cementado
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme
C	Suelo denso o firme
D	Suelo medianamente denso, o firme
E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana

En la Tabla 2.2 se muestran los parámetros que utiliza la Norma NCh 433 Of. 96 con el DS N°61 para generar los espectros de diseño de aceleración, considerando los tipos de suelos mencionados anteriormente.

Tabla 2.2: Parámetros utilizados para la generación de espectros a partir de la Norma NCh 433 Of. 96 con DS N°61.

Tipo de Suelo	S	T <sub>0</sub> [s]	p
A	0.90	0.15	2.0
B	1.00	0.30	1.5
C	1.05	0.40	1.6
D	1.20	0.75	1.0
E	1.30	1.20	1.0

La Figura 2.8 muestra el espectro de diseño de la Norma Chilena con el DS N° 61, para sus diferentes tipos de suelos, considerando una aceleración efectiva máxima  $A_0=0.4g$ . En dicha figura se puede observar que el peak de cada espectro se traslada de acuerdo a su período, y el tamaño del espectro de aceleración aumenta de acuerdo a la demanda sísmica del tipo de suelo.

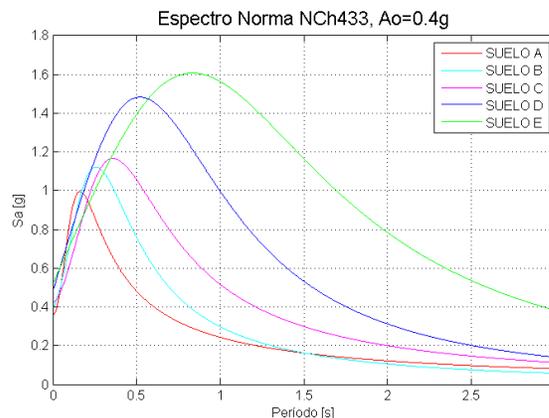


Figura 2.8: Espectro de diseño de Norma Chilena con DS N°61, utilizando diferentes tipos de suelos, para  $A_0=0.4g$ .

## 2.6. ESPECTRO DE RESPUESTA DE ACELERACIÓN CON DOS PEAKS

Los acelerogramas de pequeña amplitud, generalmente son producidos mediante pequeños a moderados terremotos, en los cuales las vibraciones libres del suelo son predominantes. Esta condición está de acuerdo con la práctica común del código sísmico que considera solamente el período fundamental del suelo en el espectro de diseño. Sin embargo, los pasos previos descritos para la condición de diseño pueden ser incorrectos dado que en los terremotos destructivos, se puede observar que las funciones de amplificación dinámica tienen más de un peak representativo: uno debido a las vibraciones del suelo y un peak debido a las ondas de la fuente sísmica (Ruiz y Saragoni, 2008).

Como una forma de representar los espectros de aceleración de terremotos chilenos, Ruiz y Saragoni (2008), propusieron espectros de respuesta de aceleración con dos peaks (el primer peak debido a las ondas de la fuente sísmica y el segundo debido a las vibraciones del suelo), considerando la sismicidad de subducción chilena de terremotos Interplaca de mecanismo inverso o tipo thrust e Intraplaca de profundidad intermedia.

El espectro de aceleración con dos peaks propuesto por Ruiz y Saragoni (2008) para un 5% de amortiguamiento, está dado por:

$$Sa_{suelo} = \frac{\left( (A \cdot a_{\max})^{0.8} \right) \cdot \left( 2 \cdot \beta \cdot \frac{T_n}{T_s} \right)}{\left( \left( 1 - \left( \frac{T_n}{T_s} \right)^2 \right)^2 + \left( 2 \cdot \beta \cdot \frac{T_n}{T_s} \right)^2 \right)^{0.5}} \quad (2.38)$$

$$Sa_{fuente} = \frac{a_{\max} + (B \cdot a_{\max}) \cdot \frac{T_n}{T_F}}{1 + \left( \frac{T_n}{T_F} \right)^3} \quad (2.39)$$

$$Sa(T_n, 0.05) = Sa_{suelo} + Sa_{fuente} \quad (2.40)$$

Donde:

$Sa_{suelo}$ : Espectro de respuesta propuesto para el efecto del suelo.

$Sa_{fuente}$ : Espectro de respuesta propuesto debido a la fuente sísmica.

$Sa(T_n, 0.05)$ : Espectro de respuesta con dos peaks propuesto por Ruiz y Saragoni.

$T_s$ : Período fundamental del suelo.

$\beta$ : Amortiguamiento del suelo.

$T_F$ : Período de fuente sísmica.

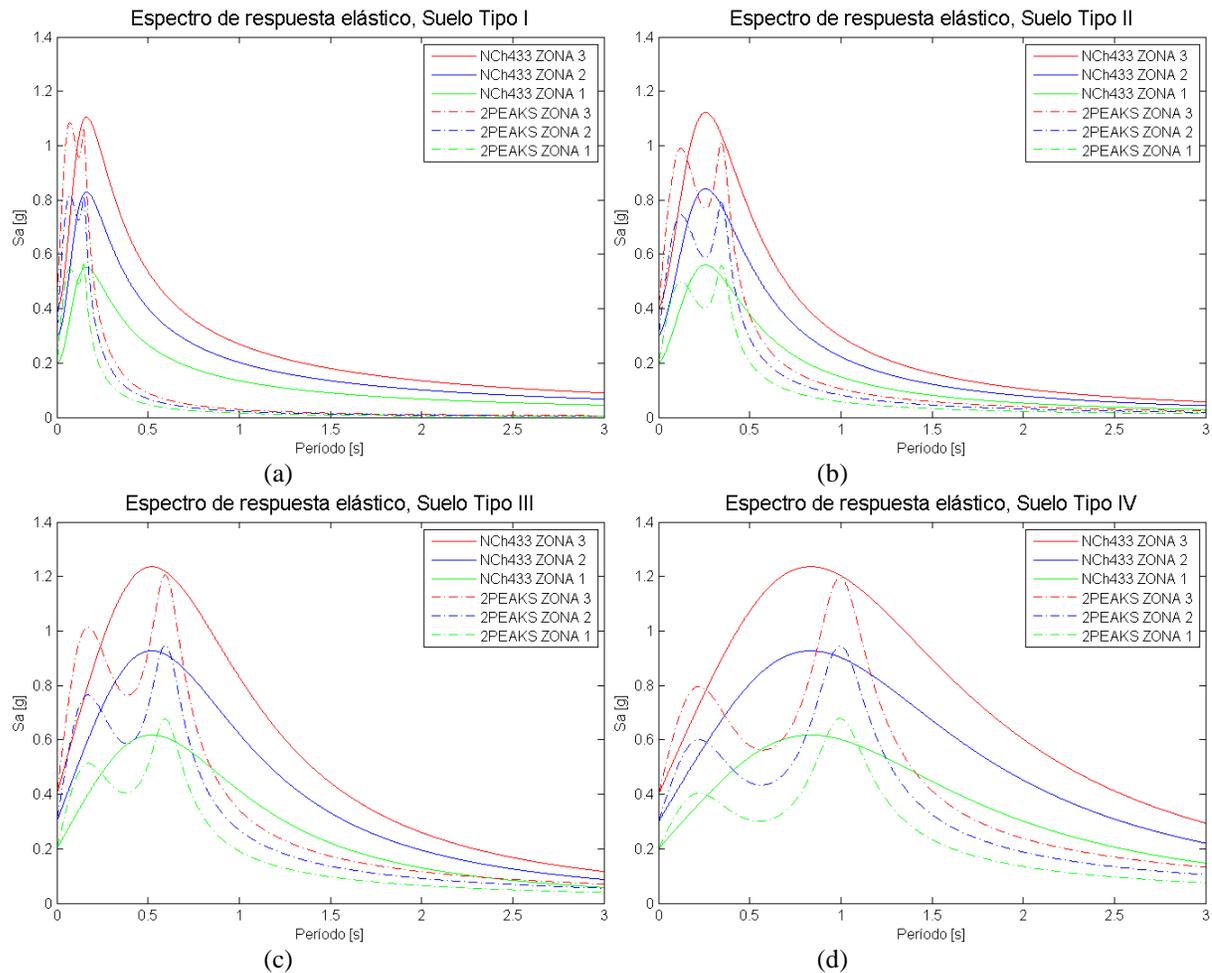
$a_{\max}$ : Aceleración máxima del suelo (PGA).

$A$  y  $B$ : Constantes para modificar el espectro de respuesta.

Ruiz y Saragoni (2008) calibran los parámetros del espectro con dos peaks, de modo de ajustarlo de acuerdo al espectro de diseño de la Norma NCh 433 Of. 96 (sin el DS N°61), lo cual se puede observar en la Figura 2.9. En la Tabla 2.3 se muestran los parámetros para la generación del espectro con dos peaks, considerando los tipos de suelo de la norma chilena antigua.

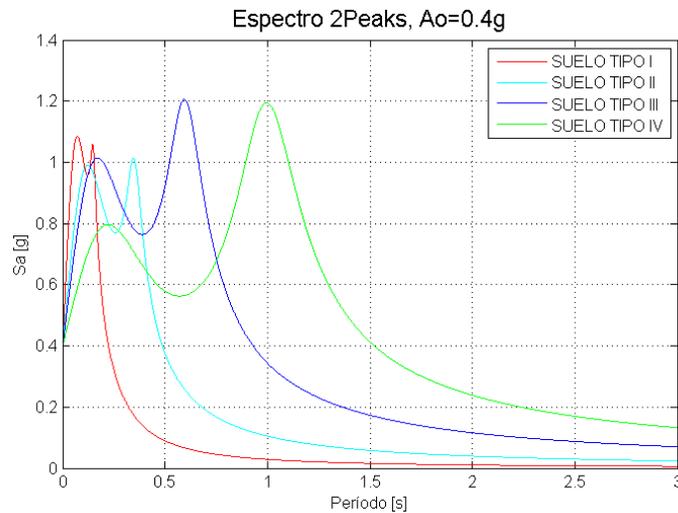
Tabla 2.3: Parámetros utilizados para la generación de espectros con dos peaks.

Tipo de Suelo	A	B	$\beta$	$T_S$ [s]	$T_F$ [s]
I	1.00	3.50	0.10	0.15	0.100
II	1.60	3.00	0.12	0.35	0.175
III	2.50	3.00	0.15	0.60	0.240
IV	2.80	2.00	0.15	1.00	0.333



**Figura 2.9:** Espectros con dos peaks comparados con el espectro de diseño de la Norma NCh433 Of. 96, para diferentes tipos de suelos y zonas sísmicas.

La Figura 2.10 muestra el espectro con dos peaks, para diferentes tipos de suelos, considerando una aceleración efectiva máxima  $A_0=0.4g$ . En dicha figura se puede observar que los peaks se trasladan de acuerdo al período de la fuente sísmica y el tipo de suelo, y el tamaño del espectro de aceleración aumenta de acuerdo a la demanda sísmica del tipo de suelo.



**Figura 2.10:** Espectro con dos peaks utilizando diferentes tipos de suelos, para  $A_0=0.4g$ .

## 2.7. VALORES MÁXIMOS DEL SUELO

Para el diseño sísmico de estructuras es necesario tener el conocimiento de la aceleración máxima del suelo, sin embargo, también es necesario conocer la velocidad y desplazamiento máximo del suelo ocasionado por el sismo para el cual se diseña la estructura. A continuación se explican brevemente estos conceptos y se presenta una figura con las series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento del registro de Concepción San Pedro, así como también se muestran los valores máximos de dichas series de tiempo (ver Figura 2.11).

### 2.7.1. Aceleración máxima del suelo (PGA)

La aceleración máxima del suelo (Peak Ground Acceleration), es una medida utilizada de la aceleración máxima del terremoto en el suelo y un parámetro de entrada de gran importancia para la ingeniería sísmica. Normalmente se utiliza la intensidad del campo gravitatorio como unidad de aceleración ( $g=9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$ ).

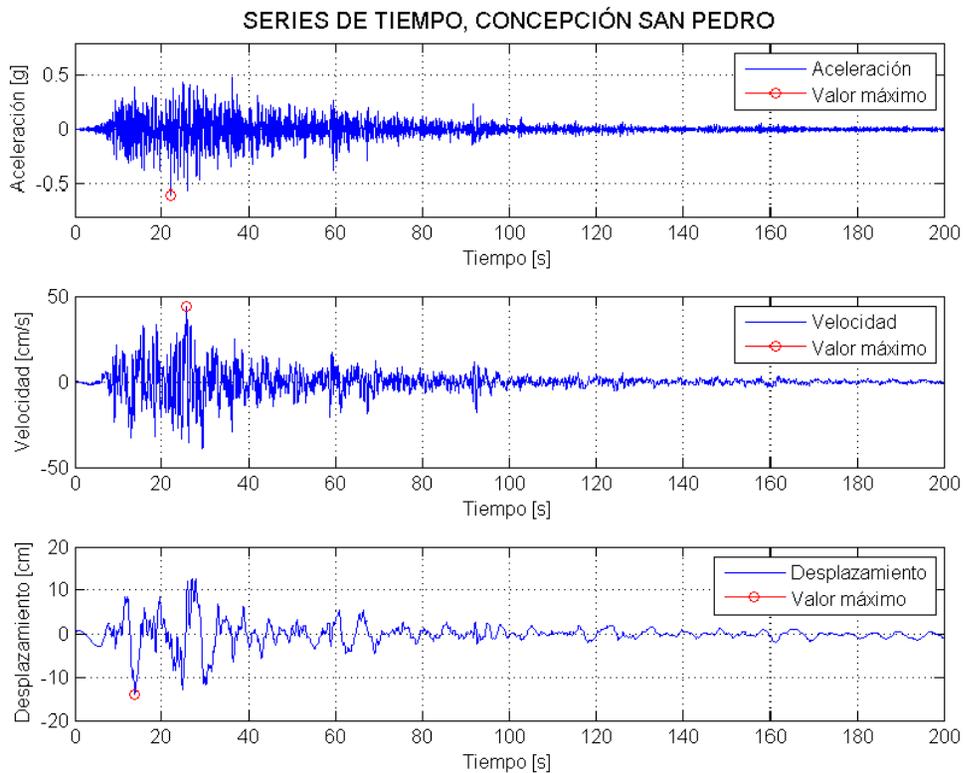
El PGA es una medida de intensidad sísmica, la cual es posible de medir con acelerómetros, que a diferencia de otras medidas que cuantifican los eventos sísmicos, como la escala de Richter o la escala de magnitud de momento, no es una medida de la energía total liberada del terremoto.

### 2.7.2. Velocidad máxima del suelo (PGV)

La velocidad máxima del suelo (Peak Ground Velocity), se calcula a partir del valor máximo de la integración del registro de aceleración. En la serie de tiempo de velocidad aparecen los impulsos de los primeros movimientos mayores de la onda S y da una clara medida del contenido de frecuencias intermedias del terremoto.

### 2.7.3. Desplazamiento máximo del suelo (PGD)

El desplazamiento máximo del suelo (Peak Ground Displacement), se calcula a partir del valor máximo de la integración de la velocidad. En la serie de tiempo de desplazamiento se puede apreciar las características de largo período del movimiento.



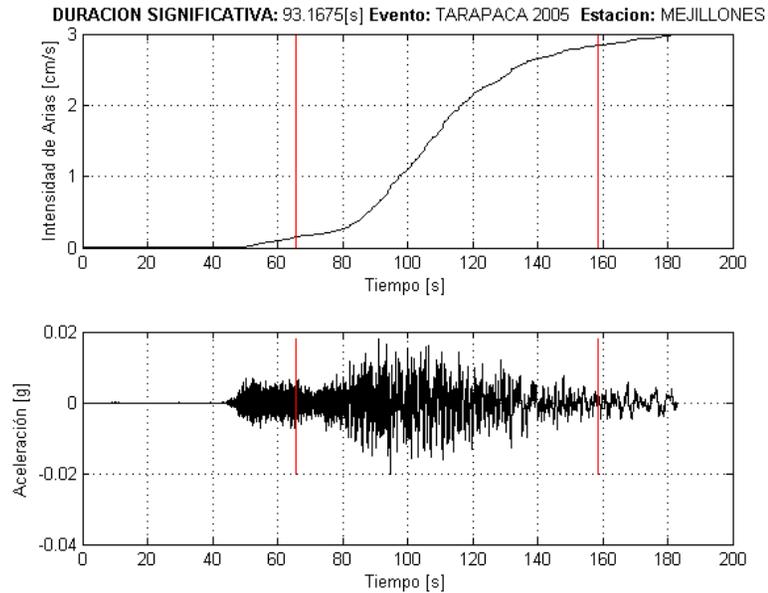
**Figura 2.11:** Series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento, y sus valores máximos.

## 2.8. DURACIÓN DE MOVIMIENTO FUERTE

La duración de movimiento fuerte es posible definirla como el intervalo de tiempo entre los instantes en que la función que representa el diagrama de Husid alcanza el 5% y el 95% de su valor final (Trifunac y Brady, 1975).

$$H(t) = \int_{t_0}^{t_0+t} a(t)^2 dt \quad (2.41)$$

Esta función se relaciona directamente con la intensidad de Arias, determinando la duración significativa del terremoto entre los límites establecidos anteriormente. En la Figura 2.12 es posible observar un ejemplo del tiempo limitado por estos rangos para un registro de Mejillones obtenido del terremoto de Tarapacá del año 2005 en Chile.



**Figura 2.12:** Ejemplo de duración de movimiento fuerte (Jorquera, 2014).

## 2.9. VALIDACIÓN DEL PROGRAMA IMPLEMENTADO EN MATLAB

El programa de compatibilización espectral se implementa en el software Matlab a partir del programa original realizado por Al Atik y Abrahamson (2010). Mediante ambos programas se realiza la compatibilización espectral (para una razón de amortiguamiento de 5%), con el fin de poder comparar resultados a través de parámetros sísmicos de registros chilenos, tales como PGA, Intensidad de Housner, Intensidad de Arias y Potencial Destructivo. La validación del programa implementado en Matlab se presenta en anexos (ANEXO A.3).

# CAPÍTULO 3. ESTUDIO DE REGISTROS COMPATIBILIZADOS

Debido a la importancia de analizar y observar de mejor manera el comportamiento del proceso de compatibilización espectral, es relevante efectuar investigaciones más exhaustivas que ayuden a entender la variación en las propiedades de los registros compatibilizados a un espectro objetivo o Target con respecto al registro original.

Para realizar estudios en forma más detallada, se compatibilizan registros chilenos al espectro de la Norma NCh 433 Of. 96 con el DS N°61 (NCh433), y al espectro con dos peaks de Ruiz y Saragoni (2008), de manera de observar la variación de las propiedades de los registros compatibilizados (PGA, Intensidad de Housner, Intensidad de Arias y Potencial Destructivo), teniendo en cuenta diferentes espectros como Target, así como también se considera el error asociado a la diferencia de espectros entre el Target y el espectro del registro compatibilizado.

El error se puede representar como un desajuste espectral promedio de la siguiente forma:

$$DesajustePromedio = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \left| \frac{Sa(T_i) - Sa_{target}(T_i)}{Sa_{target}(T_i)} \right| \cdot 100 \quad (3.1)$$

Donde:

$Sa(T_i)$ : Espectro de aceleración del registro compatibilizado en el período  $T_i$ .

$Sa_{target}(T_i)$ : Espectro de aceleración del target en el período  $T_i$ .

$N_p$ : Número de puntos del registro.

En primer lugar se realiza la compatibilización espectral a registros que tienen un espectro de respuesta de aceleración similar al de la Norma NCh433, considerando ampliaciones de los espectros antes mencionados, teniendo en cuenta diferentes niveles de aceleración máxima del suelo.

Luego, para observar el proceso de compatibilización de registros que tienen espectros de aceleración sustancialmente diferentes al de la norma chilena, se efectúan estudios a partir de los registros de Concepción Centro y Concepción San Pedro obtenidos del terremoto del Maule del año 2010 en Chile.

Finalmente se analizan los resultados obtenidos a partir de las compatibilizaciones realizadas.

### 3.1. AMPLIFICACIÓN DE REGISTROS COMPATIBILIZADOS A NORMA NCH 433 Of. 96

Para poder realizar la compatibilización espectral, se utiliza el espectro de diseño elástico de la Norma chilena NCh433 como Target, considerando amplificaciones de dicho espectro para un suelo tipo B, teniendo en cuenta los siguientes PGA efectivos ( $PGA_{eff}$ ):

$$PGA_{eff} = [0.15g, 0.30g, 0.45g]$$

La expresión del espectro de diseño elástico de la Norma Chilena NCh433 se puede escribir como:

$$Sa = S \cdot A_0 \cdot \alpha \quad (3.2)$$

Donde:

$S$  : Parámetro dependiente del tipo de suelo.

$A_0$  : Aceleración efectiva máxima, que es determinada de acuerdo a la zona sísmica.

$\alpha$  : Función de amplificación dinámica.

La función de amplificación dinámica  $\alpha$  se determina para cada modo de vibrar  $n$  y tiene la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{1 + 4.5 \left( \frac{T_n}{T_0} \right)^P}{1 + \left( \frac{T_n}{T_0} \right)^3} \quad (3.3)$$

Donde:

$T_n$  : Período de vibración del modo  $n$  .

$T_0$  y  $P$  : Parámetros relativos al tipo de suelo de fundación.

Los parámetros utilizados para el espectro de la norma chilena se presentan en la Tabla 3.1, los cuales dependen del tipo de suelo, y en vez de utilizar la aceleración efectiva máxima de dicha norma (0.2g, 0.3g y 0.4g), se utilizan los PGA efectivos descritos anteriormente.

Tabla 3.1: Parámetros de espectro de diseño de la Norma NCh433 para un suelo B.

Parámetro	Valor
S	1.00
To	0.30
p	1.50

En la Figura 3.1 se muestra el espectro de diseño de la Norma NCh433 utilizado como espectro objetivo o Target, para un suelo tipo B y distintos niveles de PGA efectivos (0.15g, 0.30g y 0.45g).

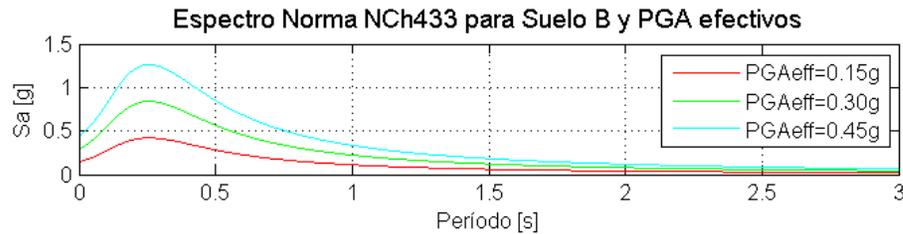


Figura 3.1: Espectro de diseño de Norma NCh433 para suelo B y distintos niveles de PGA efectivos.

Los registros que se utilizan para la compatibilización de espectros amplificados se presentan en la Tabla 3.2, los cuales fueron normalizados a un PGA aproximado de 0.3g para facilitar la compatibilización espectral.

Tabla 3.2: Registros utilizados para amplificaciones de espectros compatibilizados.

Registro	Año
Llolleo DirL	2010
Melipilla NS	1985
Santiago DirL	1985
Talca DirT	1985

Las propiedades de los registros de la Tabla 3.2, considerando el PGA, la intensidad de Arias, la intensidad de Housner y el Potencial Destructivo, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3.3: Propiedades de los registros de la Tabla 3.2 (registros iniciales).

Parámetro	Melipilla NS	Llolleo DirL	Santiago DirL	Talca DirT
PGA [g]	0.3128	0.3101	0.3103	0.3100
IA [cm/s]	230.319	447.366	281.668	283.899
IH [cm]	43.230	63.875	73.916	62.899
PD [cm*s]	1.027	8.331	2.309	2.766

Los resultados obtenidos para los registros compatibilizados considerando diferentes PGA efectivos se presentan en Tabla 3.4, en la cual se aprecia que al ir aumentando los niveles de PGA efectivos, las propiedades también aumentan, y se observa una similitud en las propiedades de los registros compatibilizados para un PGA efectivo de 0.3g con las propiedades de los registros originales presentados en la Tabla 3.3. Además se desprende de la Tabla 3.4 que al amplificar el

espectro del registro original, la destructividad del terremoto también se ve afectada, lo cual se puede apreciar de mejor manera para los valores del Potencial Destructivo, el cual es un parámetro que está bien correlacionado con los daños observados y la intensidad de Mercalli Modificada (Saragoni, Holmberg y Saéz, 1989), debido a que no sólo considera la energía del terremoto en base a la amplitud de aceleración, sino que también considera la intensidad de cruces por cero del registro.

Tabla 3.4: Propiedades de los registros compatibilizados para Norma.

<b>PGA eff</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Melipilla NS</b>	<b>Llolleo DirL</b>	<b>Santiago DirL</b>	<b>Talca DirT</b>
0.15g	PGA [g]	0.1394	0.1482	0.1624	0.1499
0.30g	PGA [g]	0.2830	0.2879	0.2796	0.3286
0.45g	PGA [g]	0.3713	0.4129	0.4540	0.4423
0.15g	IA [cm/s]	111.507	159.765	130.723	108.572
0.30g	IA [cm/s]	258.557	347.670	250.781	255.000
0.45g	IA [cm/s]	395.335	515.888	420.925	417.211
0.15g	IH [cm]	25.979	26.956	24.232	26.857
0.30g	IH [cm]	48.550	49.606	49.631	49.773
0.45g	IH [cm]	76.030	77.984	78.972	77.630
0.15g	PD [cm*s]	0.531	2.536	1.052	0.994
0.30g	PD [cm*s]	1.220	6.254	2.041	2.429
0.45g	PD [cm*s]	1.941	9.822	3.654	4.112

Como se mencionó anteriormente, el programa de compatibilización espectral funciona hasta una cierta frecuencia máxima, por lo tanto, el valor del PGA del Target, no es el mismo que el valor del PGA efectivo, lo cual se puede evidenciar en la Tabla 3.5. En la Tabla 3.6 se presenta el desajuste espectral promedio (error en porcentaje), entre el Target (espectro de Norma) y el espectro del registro compatibilizado.

Tabla 3.5: Valores del PGA del Target de Norma.

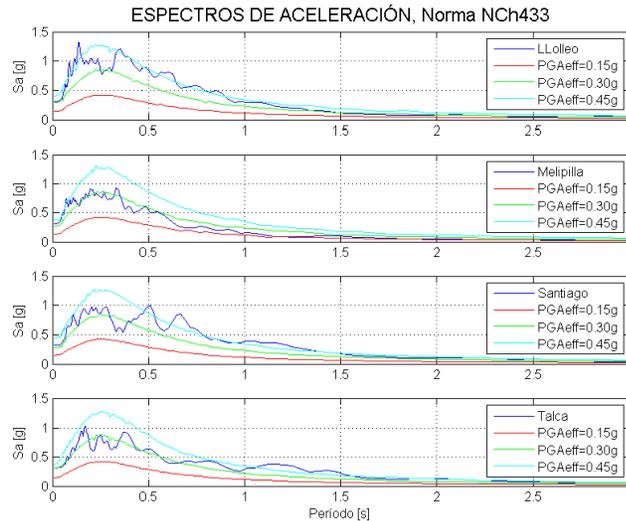
<b>PGA eff</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Melipilla NS</b>	<b>Llolleo DirL</b>	<b>Santiago DirL</b>	<b>Talca DirT</b>
0.15g	PGA [g]	0.1541	0.1541	0.1541	0.1541
0.30g	PGA [g]	0.3082	0.3082	0.3082	0.3082
0.45g	PGA [g]	0.4623	0.4623	0.4623	0.4623

Tabla 3.6: Error entre espectro de Norma y espectro de registro compatibilizado.

<b>PGA eff</b>	<b>Melipilla NS</b>	<b>Llolleo DirL</b>	<b>Santiago DirL</b>	<b>Talca DirT</b>
0.15g	3.1155	1.6471	2.2261	2.1460
0.30g	3.0985	3.0044	2.9172	2.1200
0.45g	4.6010	4.0310	1.8377	1.9868

A continuación se presentan los espectros compatibilizados de los registros de la Tabla 3.2, considerando las amplificaciones del espectro de diseño de la norma chilena para las distintos PGA efectivos. También se presentan las series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento de los registros y los registros compatibilizados.

En la Figura 3.2 se muestran los espectros de aceleración de los registros presentados en la Tabla 3.2 (Llolleo, Melipilla, Santiago y Talca), y los espectros de los registros compatibilizados a los distintos niveles de PGA efectivos. En dicha Figura es posible ver la diferencia entre los espectros de los registros reales y compatibilizados para distintos niveles de PGA.

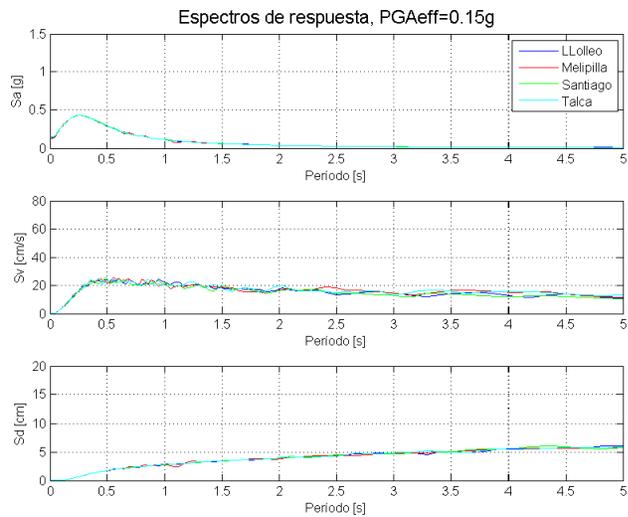


**Figura 3.2:** Espectros de aceleración de registros de Llolleo, Melipilla, Santiago y Talca y de Registros compatibilizados a distintos niveles de PGA efectivos (0.15g, 0.30g y 0.45g).

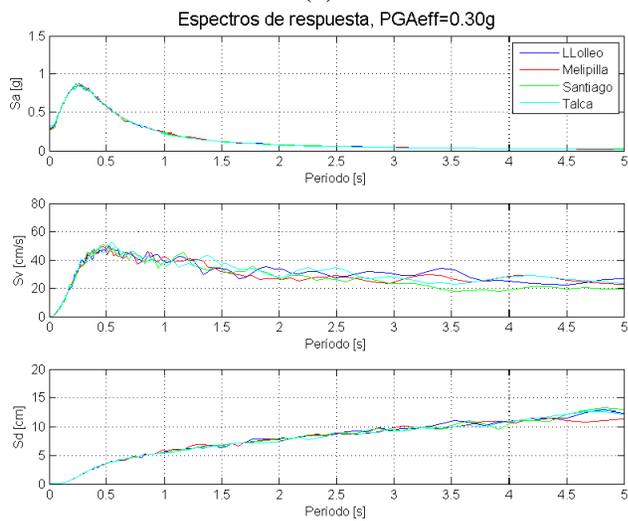
La Figura 3.3 presenta los espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento de los registros compatibilizados al espectro de la Norma Chilena NCh433 para los distintos niveles de PGA efectivos (0.15g, 0.30g y 0.45g). Se puede observar desde la Figura 3.3, que los espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento siguen la misma tendencia, a pesar de que existen pequeñas diferencias, sobre todo en los espectros de velocidad y desplazamiento, en donde al superponerlos se ve una variación mayor en comparación con los espectros de aceleración en donde el programa de compatibilización espectral trabaja.

Por último, la Figura 3.4 muestra las series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento del registro de Llolleo y de los registros compatibilizados al espectro de la Norma NCh433, utilizando los niveles de PGA efectivos antes descritos. Se observa que la distribución de aceleración de los registros compatibilizados va en aumento a medida que el PGA es mayor, lo que en definitiva desencadena el crecimiento del tamaño del espectro de la Norma y por lo tanto el espectro de los registros compatibilizados. También se desprende de la Figura 3.4, que las series de tiempo se ven mayormente modificadas en las zonas donde la aceleración tiene mayor amplitud, mientras que en otros sectores no se aprecia mayor variación.

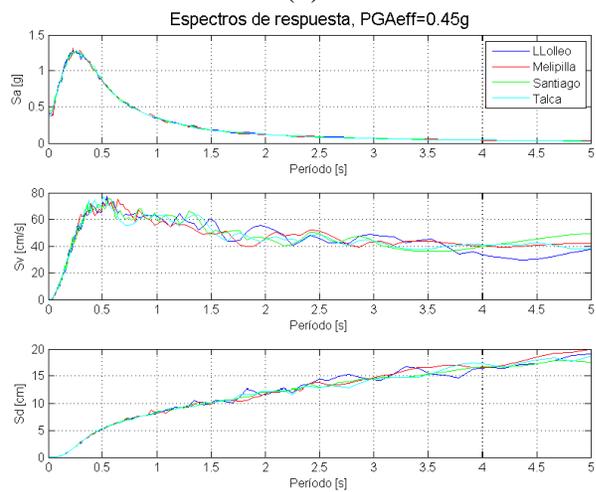
Las figuras de las series de tiempo para los registros de Melipilla, Santiago y Talca se presentan en anexos (ANEXO B.1), y tienen el mismo análisis anterior.



(a)

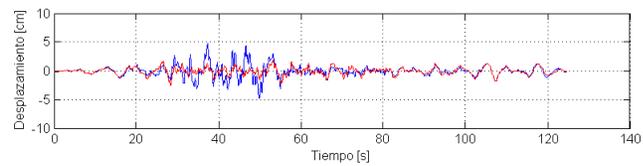
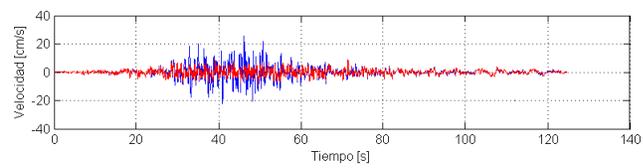
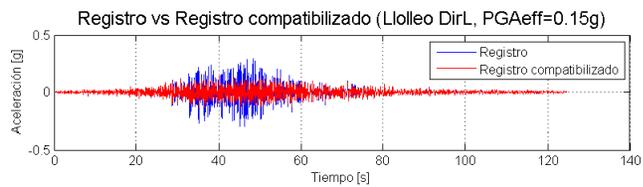


(b)

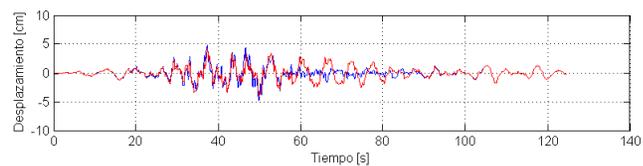
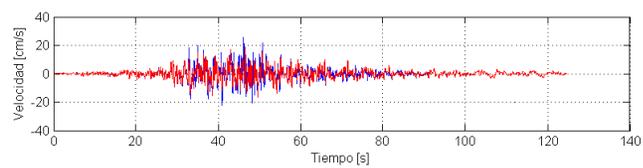
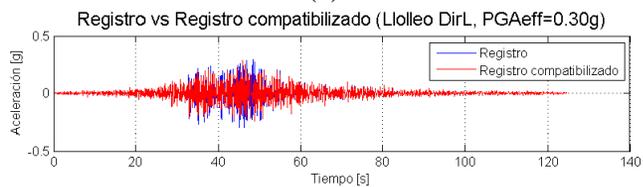


(c)

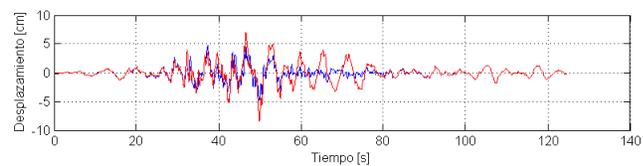
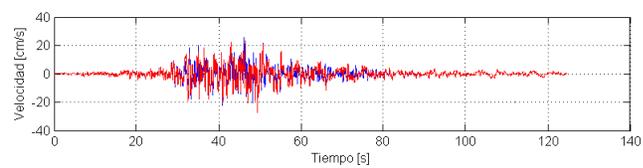
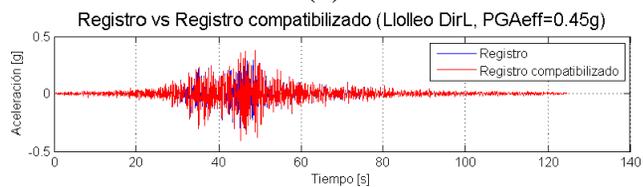
**Figura 3.3:** Espectros de Aceleración de registros compatibilizados a la Norma chilena para un PGA de 0.15g, 0.30g y 0.45g de los registros de Llole, Melipilla, Santiago y Talca.



(a)



(b)



(c)

**Figura 3.4:** Series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento para registro de Llolleo y del registro compatibilizado al espectro de la norma chilena para un PGA de 0.15g, 0.30g y 0.45g.

### 3.2. AMPLIFICACIÓN DE REGISTROS COMPATIBILIZADOS A ESPECTROS CON DOS PEAKS DE RUIZ Y SARAGONI (2008)

Para poder realizar la compatibilización espectral con otro tipo de Target, se utiliza el espectro con dos peaks de Ruiz y Saragoni (2008), considerando amplificaciones de dicho espectro para un suelo tipo B, teniendo en cuenta los siguientes PGA efectivos ( $PGA_{eff}$ ):

$$PGA_{eff} = [0.15g, 0.30g, 0.45g]$$

El espectro con dos peaks de Ruiz y Saragoni (2008) para un 5% de amortiguamiento se puede escribir como:

$$Sa(T_n, 0.05) = \frac{(A \cdot PGA_{eff})^{0.8} \cdot \left(2 \cdot \beta \cdot \frac{T_n}{T_s}\right)}{\left(\left(1 - \left(\frac{T_n}{T_s}\right)^2\right)^2 + \left(2 \cdot \beta \cdot \frac{T_n}{T_s}\right)^2\right)^{0.5}} + \frac{PGA_{eff} + (B \cdot PGA_{eff}) \cdot \frac{T_n}{T_F}}{1 + \left(\frac{T_n}{T_F}\right)^3} \quad (3.4)$$

Donde:

$Sa(T_n, 0.05)$ : Espectro de respuesta con dos peaks propuesto por Ruiz y Saragoni (2008).

$T_s$ : Período fundamental del suelo.

$\beta$ : Amortiguamiento del suelo.

$T_F$ : Período de fuente sísmica.

$PGA_{eff}$ : Aceleración máxima del suelo efectiva.

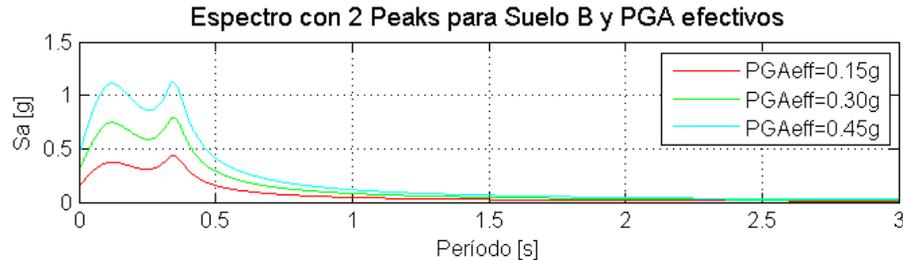
$A$  y  $B$ : Constantes para modificar el espectro de respuesta.

Los parámetros utilizados para el espectro con dos peaks se presentan en la Tabla 3.7, los cuales dependen del tipo de suelo.

Tabla 3.7: Parámetros de espectro con dos Peaks para un suelo tipo B.

Parámetro	Valor
A	1.600
B	3.000
$\beta_s$	0.120
$T_s$	0.350
$T_f$	0.175

En la Figura 3.5 se muestra el espectro de con dos peaks de Ruiz y Saragoni utilizado como Target, considerando ampliaciones de dicho espectro para un suelo tipo B y distintos niveles de PGA efectivos (0.15g, 0.30g y 0.45g). En dicha figura se pueden observar los dos peaks del espectro, donde el primer peak está asociado a las ondas de la fuente sísmica, mientras que el segundo se debe a las vibraciones del suelo.



**Figura 3.5:** Espectro con dos peaks para suelo tipo B y distintos niveles de PGA efectivos (0.15g, 0.30g y 0.45g).

Los registros utilizados para la compatibilización de espectros amplificados se presentaron en la Tabla 3.2 y sirvieron para poder realizar comparaciones entre las propiedades de dichos registros compatibilizados al espectro de la Norma Chilena y al espectro con dos peaks de Ruiz y Saragoni (2008).

En la Tabla 3.8 se presentan nuevamente las propiedades de los registros de la Tabla 3.2 (Llolleo, Melipilla, Santiago y Talca), considerando el PGA, la intensidad de Arias, la intensidad de Housner y el Potencial Destructivo, de manera de poder comparar las propiedades de los registros reales y de los registros compatibilizados.

Tabla 3.8: Propiedades de los registros de la Tabla 3.2.

<b>Parámetro</b>	<b>Melipilla NS</b>	<b>Llolleo DirL</b>	<b>Santiago DirL</b>	<b>Talca DirT</b>
PGA [g]	0.3128	0.3101	0.3103	0.3100
IA [cm/s]	230.319	447.366	281.668	283.899
IH [cm]	43.230	63.875	73.916	62.899
PD [cm*s]	1.027	8.331	2.309	2.766

Los resultados obtenidos para los registros compatibilizados al espectro de la norma chilena y al espectro con dos peaks, considerando diferentes PGA efectivos, se realizan de dos maneras; para un rango de frecuencias de 0.1 a 32 [Hz], y para un rango de 0.1 a 100 [Hz], debido a que el error o desajuste espectral entre el Target y el espectro del registro compatibilizado varía de acuerdo a estos rangos de frecuencia al realizar el proceso de compatibilización espectral. En las Tabla 3.9 y 3.10 se presentan los registros compatibilizados hasta 32 [Hz] y su error asociado respectivamente. En las Tablas 3.11 y 3.12 se muestran los resultados hasta 100 [Hz] y su error asociado.

Tabla 3.9: Propiedades de los registros compatibilizados hasta 32 [Hz].

<b>PGA eff</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Melipilla NS</b>	<b>Llolleo DirL</b>	<b>Santiago DirL</b>	<b>Talca DirT</b>
0.15g	PGA [g]	0.1518	0.1492	0.1331	0.1418
0.30g	PGA [g]	0.3212	0.2353	0.3103	0.3302
0.45g	PGA [g]	0.4186	0.3450	0.3934	0.6065
0.15g	IA [cm/s]	105.267	132.105	109.679	93.874
0.30g	IA [cm/s]	203.300	273.309	209.373	208.340
0.45g	IA [cm/s]	312.910	396.284	290.726	309.324
0.15g	IH [cm]	16.470	14.931	15.212	15.475
0.30g	IH [cm]	28.500	28.038	29.007	32.680
0.45g	IH [cm]	36.998	41.577	44.736	40.325
0.15g	PD [cm*s]	0.449	1.768	0.707	0.748
0.30g	PD [cm*s]	0.881	4.217	1.477	1.827
0.45g	PD [cm*s]	1.391	6.579	2.182	2.697

Tabla 3.10: Error entre target y espectro de registro compatibilizado hasta 32 [Hz].

<b>PGA eff</b>	<b>Melipilla NS</b>	<b>Llolleo DirL</b>	<b>Santiago DirL</b>	<b>Talca DirT</b>
0.15g	4.5269	3.7402	5.0172	5.2451
0.30g	3.3867	7.0950	4.9756	2.8075
0.45g	5.2638	6.8056	5.4072	3.3445

Tabla 3.11: Propiedades de los registros compatibilizados hasta 100 [Hz].

<b>PGA eff</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Melipilla NS</b>	<b>Llolleo DirL</b>	<b>Santiago DirL</b>	<b>Talca DirT</b>
0.15g	PGA [g]	0.2421	0.1754	0.1683	0.1684
0.30g	PGA [g]	0.3695	0.3940	0.2882	0.4101
0.45g	PGA [g]	0.5632	0.4954	0.5510	0.6501
0.15g	IA [cm/s]	105.840	131.165	109.611	95.755
0.30g	IA [cm/s]	209.724	274.072	208.856	209.449
0.45g	IA [cm/s]	297.451	374.590	292.981	300.222
0.15g	IH [cm]	16.414	15.147	15.272	15.738
0.30g	IH [cm]	30.129	28.334	29.906	29.044
0.45g	IH [cm]	38.221	38.623	38.596	38.579
0.15g	PD [cm*s]	0.442	1.717	0.731	0.779
0.30g	PD [cm*s]	0.906	4.476	1.524	1.788
0.45g	PD [cm*s]	1.302	6.297	2.264	2.690

Tabla 3.12: Error entre target y espectro de registro compatibilizado hasta 100 [Hz].

<b>PGA eff</b>	<b>Melipilla NS</b>	<b>Llolleo DirL</b>	<b>Santiago DirL</b>	<b>Talca DirT</b>
0.15g	3.1014	1.4523	1.1687	1.5673
0.30g	1.8296	2.2998	1.8655	2.5884
0.45g	2.0724	1.9695	1.6182	2.7377

Al considerar las Tablas anteriores, se puede apreciar que al realizar la compatibilización hasta 32 [Hz] o hasta 100 [Hz], los resultados no varían en forma sustancial, es decir, la variación es pequeña, sin embargo, los errores asociados son diferentes, ya que para el caso de la Tabla 3.12, se observa que los errores son menores utilizando un rango de frecuencia hasta 100 [Hz],

mientras que utilizando un rango menor, el error es mayor, como se puede ver en la Tabla 3.10, donde los valores en ocasiones superan el 5%.

Como se mencionó anteriormente, el programa de compatibilización espectral funciona hasta una cierta frecuencia máxima, por lo tanto, el valor del PGA del Target, no es el mismo que el valor del PGA efectivo, lo cual se puede evidenciar en la Tabla 3.13.

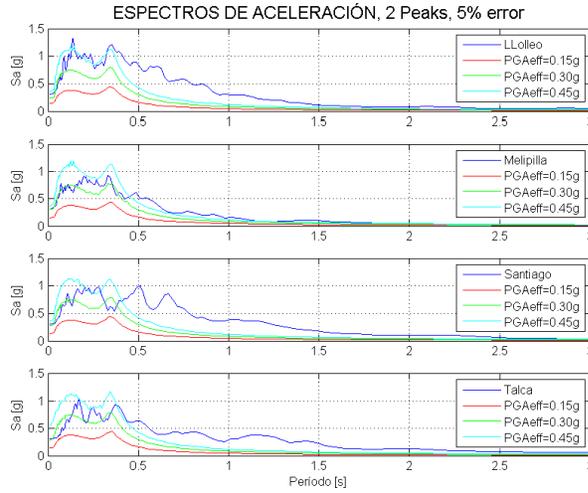
Tabla 3.13: Valores del PGA del Target.

<b>PGA eff</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Melipilla NS</b>	<b>Llolleo DirL</b>	<b>Santiago DirL</b>	<b>Talca DirT</b>
0.15g	PGA [g]	0.1779	0.1779	0.1779	0.1779
0.30g	PGA [g]	0.3552	0.3552	0.3552	0.3552
0.45g	PGA [g]	0.5323	0.5323	0.5323	0.5323

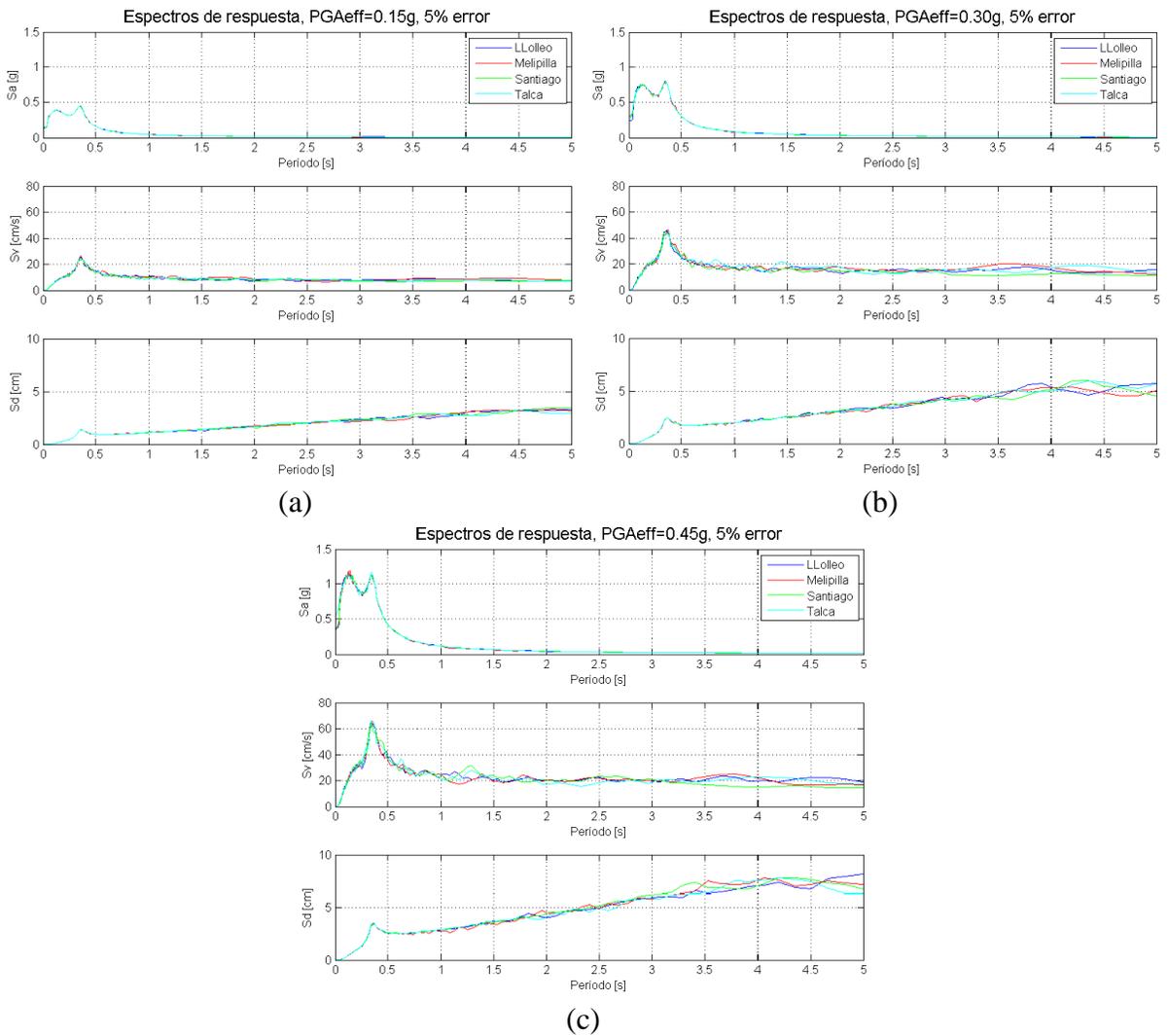
Otra comparación importante, es entre los resultados de los registros compatibilizados al espectro de la Norma y el de dos Peaks. Dicha comparación es posible realizar mediante las Tablas 3.4 y 3.9, en las cuales se presentan los valores de las propiedades de los registros compatibilizados a ambos espectros. Como se puede apreciar, los valores de los registros compatibilizados al espectro de la Norma, son mayores que los de los registros compatibilizados al espectro con dos Peaks, lo cual se puede explicar principalmente mediante la diferencia que existe entre ambos espectros, ya que el espectro con dos Peaks es de menor tamaño que el de la Norma chilena. Una explicación más detallada es realizada en los siguientes capítulos.

Finalmente en las Figuras 3.6 y 3.7 se muestran los espectros de los registros presentados en la Tabla 3.2 (Llolleo, Melipilla, Santiago y Talca), compatibilizados al espectro con dos peaks considerando los diferentes niveles de PGA efectivos, para un error aproximado de 5%. En la Figura 3.6 se puede apreciar la diferencia entre los espectros de los registros reales y compatibilizados para diferentes niveles de PGA. A partir de la Figura 3.7 se observa que los espectro de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamientos de los registros compatibilizados, siguen la misma tendencia, sin embargo, para los espectros de velocidad y desplazamiento, al igual que para el caso del espectro de la norma chilena, se ve una mayor variación en comparación con los espectros de aceleración.

En anexos se presentan las series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento de los registros originales de la Tabla 3.2, además de los registros compatibilizados, considerando las amplificaciones del espectro con dos peaks de Ruiz y Saragoni (2008) para los distintos niveles de PGA efectivos (ANEXO B.2). Dichas series de tiempo tienen el mismo análisis que en la sección anterior, es decir, se observa mayor variación en zonas donde el registro de aceleración tiene una mayor amplitud.



**Figura 3.6:** Espectros de Aceleración de registros de Llole, Melipilla, Santiago y Talca y de Registros compatibilizados a distintos niveles de PGA efectivos (0.15g, 0.30g y 0.45g).



**Figura 3.7:** Espectros de Aceleración de registros compatibilizados a espectro con dos Peaks para un PGA de 0.15g, 0.30g y 0.45g de los registros de Llole, Melipilla, Santiago y Talca.

### 3.3. AMPLIFICACIÓN DE REGISTROS COMPATIBILIZADOS A ESPECTRO CON DOS PEAKS DE RUIZ Y SARAGONI (2008) CON UN 20% DE ERROR Y ESCALADO A PGA

El desajuste espectral entre el espectro de un registro y el target es un parámetro importante para realizar la compatibilización de espectros, debido a que el error asociado al desajuste determina las propiedades del registro compatibilizado y la forma de su espectro.

Otro factor relevante para realizar la compatibilización espectral, es escalar el registro al PGA del Target en cada paso de ajuste, debido a que al realizar esto, las propiedades del registro compatibilizado pueden ser alterados al modificar el registro en cada paso de ajuste, sin embargo, es una buena alternativa cuando el espectro del registro original es sustancialmente diferente al del Target, ya que al realizar el escalamiento, el desajuste espectral disminuye.

Por lo tanto se utiliza el espectro con dos peaks de Ruiz y Saragoni (2008), para poder realizar la compatibilización espectral con un 20% de error, y también se escala al PGA del Target en cada paso de ajuste en el programa de compatibilización espectral, considerando amplificaciones de dicho espectro para un suelo B, teniendo en cuenta los siguientes PGA efectivos ( $PGA_{eff}$ ):

$$PGA_{eff} = [0.15g, 0.30g, 0.45g]$$

Los parámetros utilizados para el espectro con dos peaks se presentan en la Tabla 3.14, los cuales dependen del tipo de suelo.

Tabla 3.14: Parámetros de espectro con dos Peaks para un suelo tipo B.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
A	1.600
B	3.000
$\beta_s$	0.120
Ts	0.350
Tf	0.175

Los registros utilizados para la compatibilización de espectros amplificados se presentaron en la Tabla 3.2 y sirvieron para poder realizar comparaciones entre los espectros de la Norma Chilena y los espectros con dos peaks de Ruiz y Saragoni (2008).

Se presentan nuevamente las propiedades de los registros de la Tabla 3.2, considerando el PGA, la intensidad de Arias, la intensidad de Housner y el Potencial Destructivo para poder comparar los registros reales con los registros compatibilizados.

Tabla 3.15: Propiedades de los registros de la Tabla 3.2.

<b>Parámetro</b>	<b>Melipilla NS</b>	<b>Llolleo DirL</b>	<b>Santiago DirL</b>	<b>Talca DirT</b>
PGA [g]	0.3128	0.3101	0.3103	0.3100
IA [cm/s]	230.319	447.366	281.668	283.899
IH [cm]	43.230	63.875	73.916	62.899
PD [cm*s]	1.027	8.331	2.309	2.766

Los resultados obtenidos para los registros compatibilizados, considerando diferentes PGA efectivos, y utilizando un 20% de error entre el target y el espectro del registro compatibilizado para un paso de ajuste, son presentados en la Tabla 3.18. También se presentan los resultados anteriormente mostrados para los registros compatibilizados, utilizando un rango de frecuencias de 0.1 a 32 [Hz] en la Tabla 3.16, el cual tiene un error aproximado de un 5% para realizar la comparación entre un error de un 5% y 20%. Posteriormente en la Tabla 3.20 se presentan los resultados para un 20% de error escalando el registro al PGA antes de realizar la compatibilización en cada paso de ajuste. Las Tablas 3.17, 3.19 y 3.21 presentan los errores.

Tabla 3.16: Propiedades de los registros compatibilizados para 5% de error.

<b>PGA eff</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Melipilla NS</b>	<b>Llolleo DirL</b>	<b>Santiago DirL</b>	<b>Talca DirT</b>
0.15g	PGA [g]	0.1518	0.1492	0.1331	0.1418
0.30g	PGA [g]	0.3212	0.2353	0.3103	0.3302
0.45g	PGA [g]	0.4186	0.3450	0.3934	0.6065
0.15g	IA [cm/s]	105.267	132.105	109.679	93.874
0.30g	IA [cm/s]	203.300	273.309	209.373	208.340
0.45g	IA [cm/s]	312.910	396.284	290.726	309.324
0.15g	IH [cm]	16.470	14.931	15.212	15.475
0.30g	IH [cm]	28.500	28.038	29.007	32.680
0.45g	IH [cm]	36.998	41.577	44.736	40.325
0.15g	PD [cm*s]	0.449	1.768	0.707	0.748
0.30g	PD [cm*s]	0.881	4.217	1.477	1.827
0.45g	PD [cm*s]	1.391	6.579	2.182	2.697

Tabla 3.17: Error entre target y espectro de registro compatibilizado para 5% de error.

<b>PGA eff</b>	<b>Melipilla NS</b>	<b>Llolleo DirL</b>	<b>Santiago DirL</b>	<b>Talca DirT</b>
0.15g	4.5269	3.7402	5.0172	5.2451
0.30g	3.3867	7.0950	4.9756	2.8075
0.45g	5.2638	6.8056	5.4072	3.3445

Tabla 3.18: Propiedades de los registros compatibilizados para un 20% de error para un paso de ajuste.

<b>PGA eff</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Melipilla NS</b>	<b>Llolleo DirL</b>	<b>Santiago DirL</b>	<b>Talca DirT</b>
0.15g	PGA [g]	0.2010	0.1745	0.1654	0.1584
0.30g	PGA [g]	0.3181	0.2644	0.2576	0.4068
0.45g	PGA [g]	0.3699	0.3957	0.4143	0.5181
0.15g	IA [cm/s]	142.176	162.612	123.549	130.702
0.30g	IA [cm/s]	213.580	307.001	203.986	225.532
0.45g	IA [cm/s]	246.620	387.189	258.051	297.072
0.15g	IH [cm]	20.975	20.274	21.345	23.673
0.30g	IH [cm]	36.792	34.723	33.478	39.220
0.45g	IH [cm]	39.575	44.171	50.585	50.935
0.15g	PD [cm*s]	0.599	2.393	0.838	1.104
0.30g	PD [cm*s]	0.941	5.204	1.499	2.112
0.45g	PD [cm*s]	1.097	6.965	2.031	2.830

Tabla 3.19: Error entre target y espectro de registro compatibilizado para error de 20%.

<b>PGA eff</b>	<b>Melipilla NS</b>	<b>Llolleo DirL</b>	<b>Santiago DirL</b>	<b>Talca DirT</b>
0.15g	17.4687	16.8316	20.1428	21.6831
0.30g	20.5961	19.8742	19.8091	20.4790
0.45g	21.6043	14.6675	20.0429	21.3391

Tabla 3.20: Propiedades de los registros compatibilizados para un 20% de error escalado a PGA.

<b>PGA eff</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Melipilla NS</b>	<b>Llolleo DirL</b>	<b>Santiago DirL</b>	<b>Talca DirT</b>
0.15g	PGA [g]	0.1528	0.1548	0.1388	0.2047
0.30g	PGA [g]	0.3052	0.3038	0.2509	04058
0.45g	PGA [g]	0.4574	0.4494	0.3814	0.5993
0.15g	IA [cm/s]	50.778	96.477	51.959	56.434
0.30g	IA [cm/s]	199.307	373.771	193.864	213.780
0.45g	IA [cm/s]	444.764	802.955	431.975	475.132
0.15g	IH [cm]	17.955	20.342	20.405	20.237
0.30g	IH [cm]	35.524	38.138	32.535	38.610
0.45g	IH [cm]	53.088	54.777	48.048	59.941
0.15g	PD [cm*s]	0.222	1.635	0.396	0.535
0.30g	PD [cm*s]	0.878	6.231	1.435	2.013
0.45g	PD [cm*s]	1.959	13.006	3.163	4.425

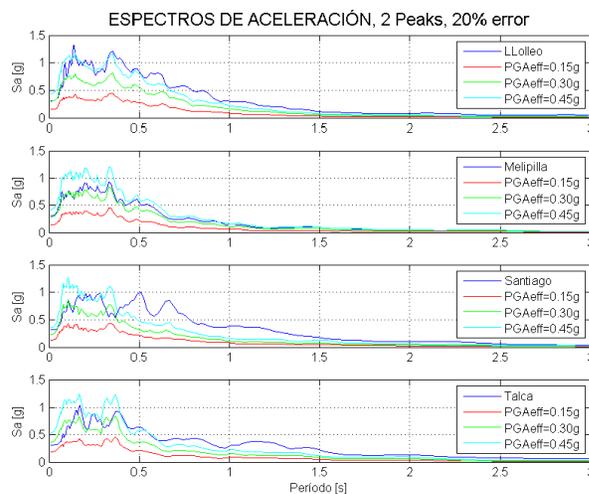
Tabla 3.21: Error entre target y espectro de registro compatibilizado para error de 20% escalado a PGA.

<b>PGA eff</b>	<b>Melipilla NS</b>	<b>Llolleo DirL</b>	<b>Santiago DirL</b>	<b>Talca DirT</b>
0.15g	18.2142	19.0661	22.7823	19.2620
0.30g	20.2483	19.4772	19.1397	19.2416
0.45g	21.2707	18.2136	20.4933	20.4750

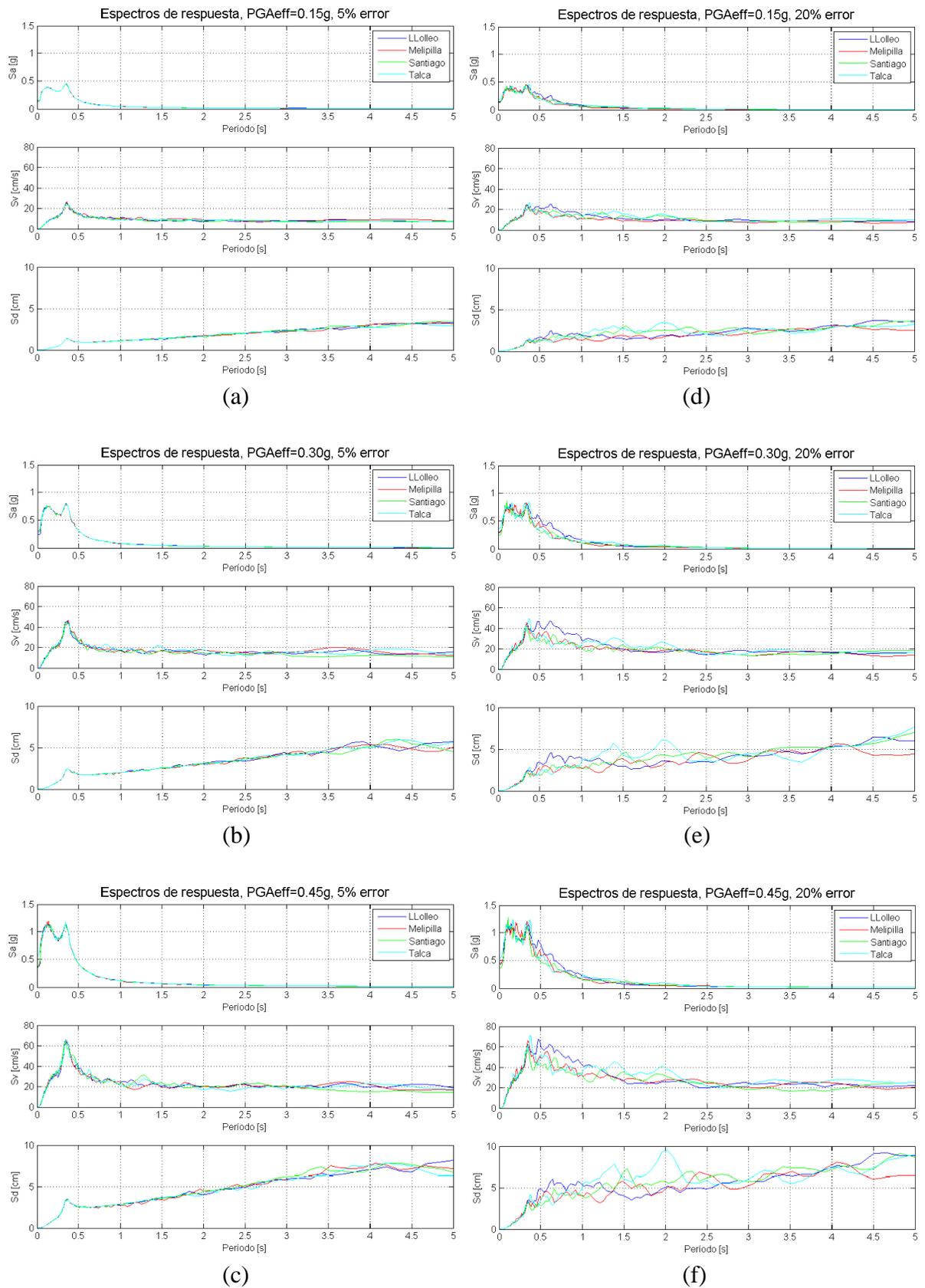
Al realizar una comparación para las Tablas 3.16 y 3.18, se puede ver que los resultados tienen una notoria variación al utilizar un error de un 5% y un 20%, sin embargo, se ve una mayor diferencia al hacer la comparación con la Tabla 3.20, donde los valores son en mayor medida diferentes, debido a que se escala el registro en cada paso de ajuste al momento de realizar la compatibilización espectral. A pesar de las modificaciones que se hacen, los resultados tienen una tendencia similar, sin embargo, los mejores resultados se obtienen cuando se realiza la compatibilización con un error menor al 5% entre el espectro del registro compatibilizado y el target.

Por último, en la Figura 3.8 se puede apreciar la diferencia entre los espectros de aceleración de los registros reales y compatibilizados para diferentes niveles de PGA, considerando un error de 20% y escalado a PGA. La Figura 3.9 muestra los espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamientos de los registros compatibilizados, considerando diferentes niveles de PGA efectivos, para un error aproximado de 5% y 20% escalado a PGA. En la Figura 3.9 se puede apreciar una clara tendencia de los espectros de respuesta para todos los registros con un error de 5%, mientras que para el error del 20%, se observa cierta tendencia de los espectros de respuesta, sin embargo, para períodos largos se aprecia que la tendencia tiene una mayor variación. La tendencia para el 20% de error, es menos clara debido a que al considerar un mayor error en el desajuste espectral, el registro no se ve sustancialmente modificado, y por lo tanto, el espectro del registro compatibilizado no se ajusta en forma completa al Target.

En anexos se presentan las series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento de los registros originales de la Tabla 3.2, y de los registros compatibilizados, considerando las amplificaciones del espectro con dos peaks de Ruiz y Saragoni (2008), para los distintos niveles de PGA efectivos con un error de un 20% y escalado a PGA (ANEXO B.3), y tienen el mismo análisis que en las secciones anteriores.



**Figura 3.8:** Espectros de Aceleración de registros de Llolleo, Melipilla, Santiago y Talca y de Registros compatibilizados a espectro con dos peaks para un error de 20% y escalado a PGA, para distintos niveles de PGA efectivos (0.15g, 0.30g y 0.45g).



**Figura 3.9:** Espectros de respuesta de registros compatibilizados a espectro con dos Peaks con 5% y 20% de error escalado a PGA, para un PGA de 0.15g, 0.30g y 0.45g de los registros de Llole, Melipilla, Santiago y Talca.

### **3.4. ESTUDIO DE REGISTROS DE CONCEPCIÓN**

A partir de los registros obtenidos del terremoto del Maule del año 2010 en Chile, es posible realizar un estudio más detallado del proceso de compatibilización espectral, considerando los registros de Concepción Centro y Concepción San Pedro, teniendo en cuenta la diferencia que existe entre los espectros de aceleración de estos registros y el espectro de diseño de la norma chilena NCh433.

Al tener registros con espectros de aceleración sustancialmente diferentes al espectro de diseño de la norma de diseño sísmico de edificios, es posible entender de mejor manera el proceso de compatibilización espectral, ya que anteriormente se tomaron registros que contenían espectros de aceleración similares al espectro de diseño de la norma NCh433, lo que conlleva a que la modificación del registro mediante la compatibilización espectral no sea en forma sustancial, a diferencia de los registros de concepción, donde se tienen espectros diferentes.

Para realizar un estudio comparativo, se utiliza como Target, el espectro de diseño de la norma chilena NCh433, el cual es sustancialmente diferente a los espectros de aceleración de los registros de Concepción, y también se emplea como Target el espectro de respuesta de aceleración con dos peaks realizado por Ruiz y Saragoni (2008), debido a que los parámetros de este espectro se pueden calibrar y ajustar para que sea semejante a los espectros de aceleración de los registros de Concepción, los cuales precisamente tienen dos peaks; el primero debido a las ondas de la fuente sísmica, y el segundo debido a las vibraciones del suelo. Por lo tanto, al emplear estos dos espectros como Target, se puede estudiar el proceso de compatibilización espectral de mejor manera.

Como se mencionó anteriormente, se hacen estudios con los registros de Concepción en su dirección Longitudinal y Transversal, calculando las propiedades de los registros reales y los registros compatibilizados para poder realizar una comparación y ver la variación al utilizar el espectro de diseño de la norma chilena y el espectro con dos peaks de Ruiz y Saragoni (2008).

Para un mejor entendimiento se muestran figuras correspondientes al proceso de compatibilización para el registro de Concepción Centro Longitudinal.

#### **3.4.1. Espectros de respuesta mediante Norma Chilena NCh433**

El espectro de diseño elástico de la Norma Chilena se utiliza como target para realizar la compatibilización espectral de los registros de Concepción, el cual se puede visualizar en la ecuación (3.2). Los parámetros de dicha ecuación varían dependiendo de la zona sísmica, el período de vibración y el tipo de suelo.

Antes de realizar la compatibilización, se normaliza el espectro de diseño al PGA de cada registro utilizado, lo cual se obtiene dividiendo el espectro de diseño por su propio PGA, para después multiplicarlo por el PGA del registro, es decir:

$$Sa_{Normalizado} = \frac{Sa}{PGA_{Sa}} \cdot PGA_{Registro} \quad (3.5)$$

Donde:

$Sa_{Normalizado}$  : Espectro normalizado a PGA de registro.

$Sa$  : Espectro de diseño elástico original.

$PGA_{Registro}$  : PGA del registro.

$PGA_{Sa}$  : PGA del espectro de diseño.

Los parámetros que se utilizan para el espectro de diseño correspondientes a la Norma Chilena del registro de Concepción Centro para un suelo tipo E se muestran a continuación:

Tabla 3.22: Parámetros de espectro para registro de Concepción Centro.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Ao	0.4g
S	1.3
To	1.2
p	1.0

Los parámetros que se usan para el espectro de diseño correspondientes a la Norma Chilena del registro de Concepción San Pedro para un suelo tipo D se muestran a continuación:

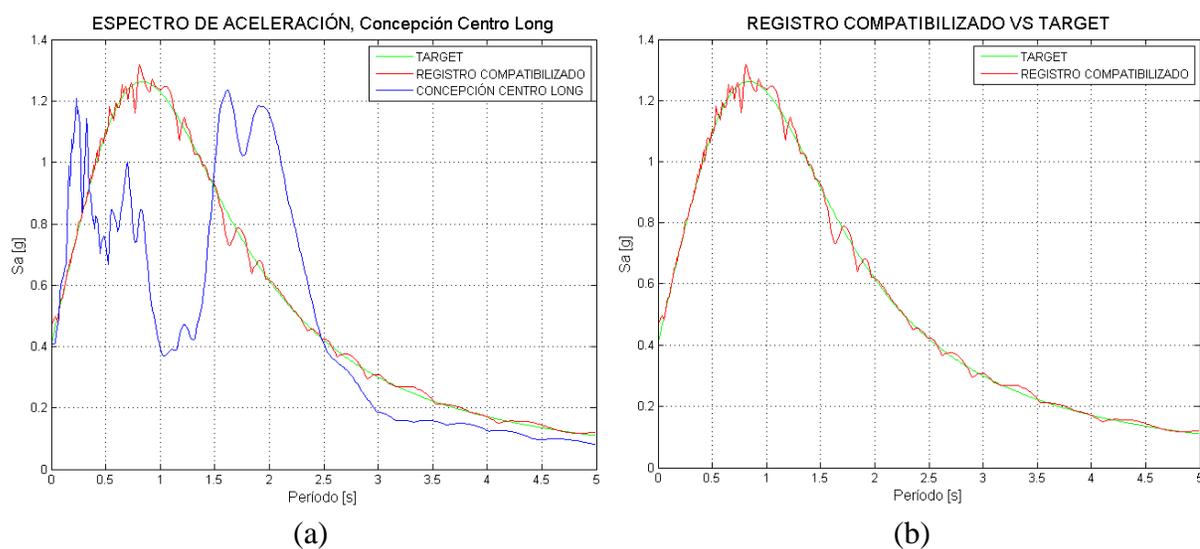
Tabla 3.23: Parámetros de espectro para registro de Concepción San Pedro.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Ao	0.4g
S	1.20
To	0.75
p	1.00

En la Figura 3.10 (a), se puede observar el espectro de aceleración del registro de Concepción Centro Longitudinal (color azul), el registro compatibilizado al espectro de la norma NCh433 (color rojo) y el espectro de diseño de la norma chilena como target (color verde). Como

se puede apreciar en dicha figura, el proceso de compatibilización elimina la energía asociada al segundo peak del espectro de aceleración del registro original debido a las vibraciones del suelo, lo cual se puede ver entre los períodos 1.5 y 2.5 segundos. Para el caso del primer peak debido a las ondas de la fuente sísmica, el espectro de aceleración del registro original es cercano al Target, y por lo tanto, al realizar la compatibilización espectral, la energía asociada a ese peak, no se ve afectada completamente. Además, se puede observar que entre los períodos 0.3 y 2.5 segundos aproximadamente, es la zona donde los espectros son sustancialmente diferentes, y se ve un mayor desajuste espectral, lo que conlleva finalmente a una mayor modificación del registro debido a esa zona. Cabe mencionar, que al eliminar la energía asociada al segundo peak del espectro original mediante el proceso de compatibilización, se está cambiando el período fundamental del suelo, lo cual es una desventaja del espectro de diseño de la norma chilena para suelos que presentan este tipo de período.

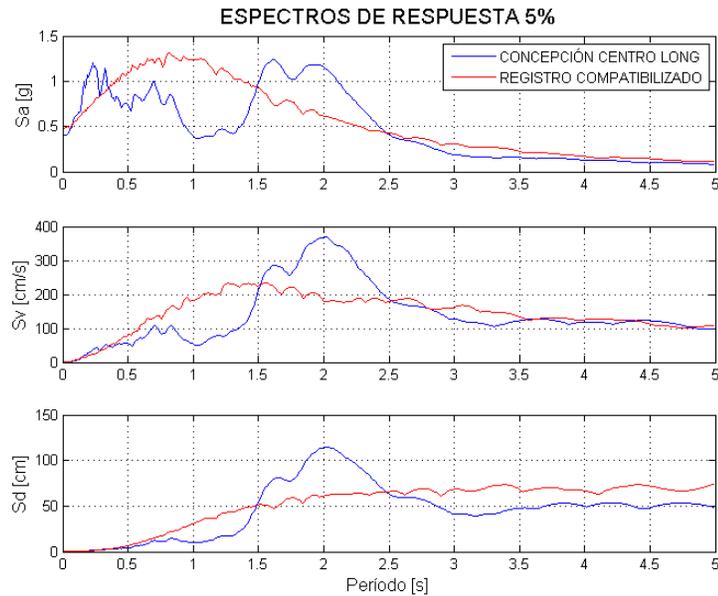
El espectro de aceleración del registro compatibilizado al espectro de la norma chilena se puede ver en la Figura 3.10 (b), en la cual se observa que el proceso de compatibilización se realiza en forma correcta, ajustándose al target en el rango de períodos de 0 a 5 segundos. Sin embargo, el PGA del registro compatibilizado es mayor al del target, esto se puede explicar debido a que el programa no puede trabajar con frecuencias muy altas, es decir, períodos muy bajos, por lo tanto, para esos períodos, el proceso de compatibilización no se ajusta fielmente al target.



**Figura 3.10:** Espectro de respuesta de Concepción Centro Longitudinal y Registro Compatibilizado al espectro de diseño de la norma NCh433.

En la Figura 3.11 se pueden ver los espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento del registro de Concepción Centro Longitudinal (color azul), y del registro compatibilizado al target (color rojo). Se puede visualizar, que los espectros de respuesta de ambos registros son totalmente diferentes, debido a la modificación del registro original para que

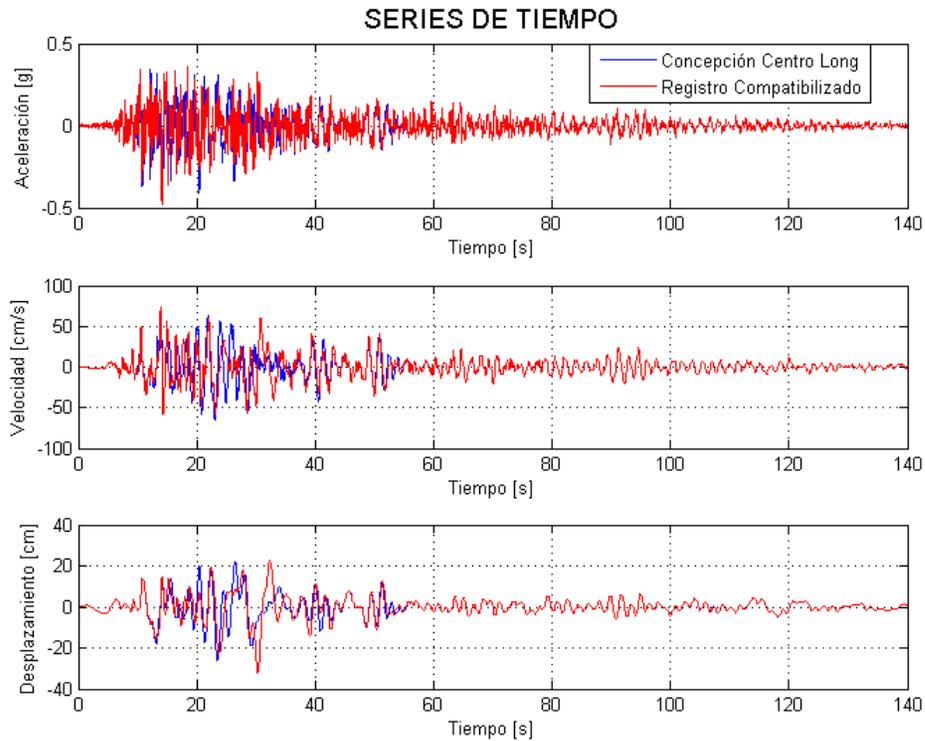
pueda tener un espectro de aceleración compatibilizado al target. Además, se puede apreciar de la Figura 3.11, que para los períodos entre 1.5 y 2.5 segundos, la energía asociada a los peaks de los espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento del registro original, es eliminada al realizar la compatibilización.



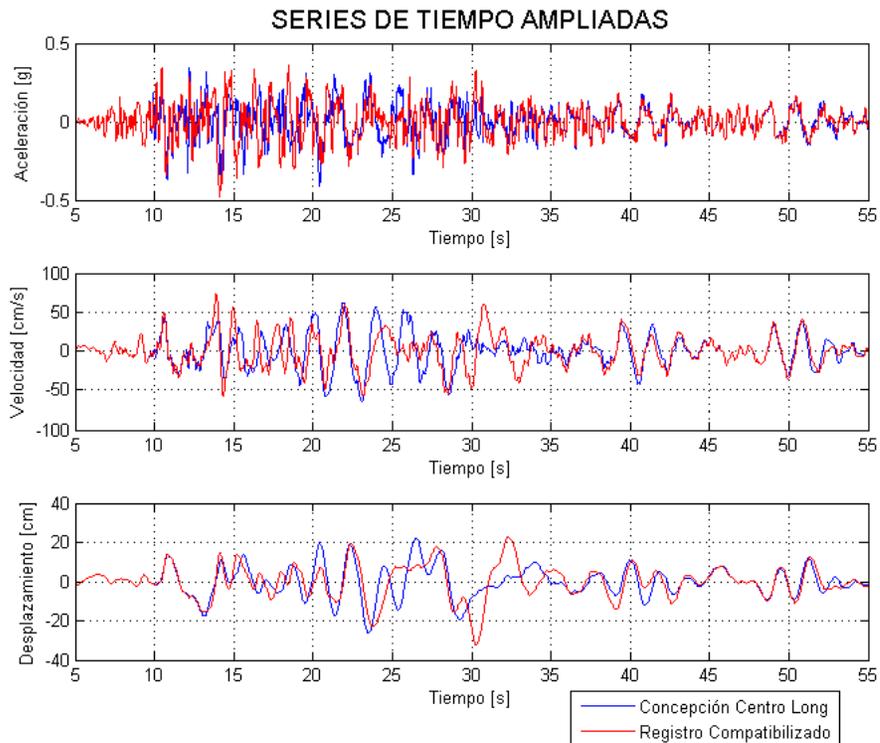
**Figura 3.11:** Espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento de registro de Concepción Centro Longitudinal (azul) y de registro compatibilizado a espectro de diseño de la norma NCh433 (rojo).

Al realizar el proceso de compatibilización, el registro original puede ser modificado sustancialmente dependiendo de las diferencias entre el espectro de aceleración del registro y el target. En la Figura 3.12 se muestran las series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento del registro de Concepción Centro Longitudinal (azul), y el registro compatibilizado al target (rojo). Se desprende de dicha figura, que las series de tiempo del registro compatibilizado no varían en gran magnitud con respecto a las series de tiempo originales, a pesar de haber utilizado un Target totalmente diferente al espectro de aceleración del registro de Concepción Centro Longitudinal, sin embargo, en zonas donde la amplitud de las series es mayor, se observa una variación importante.

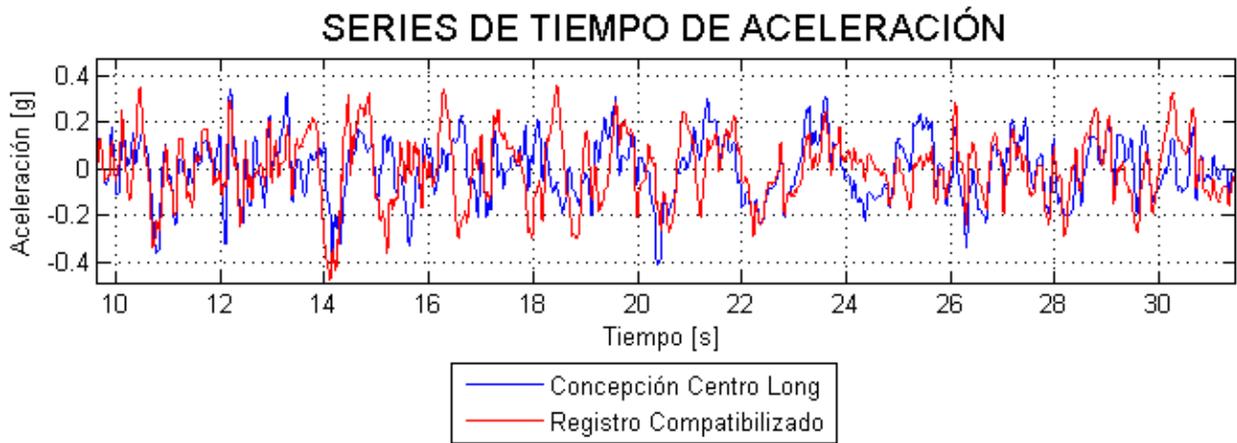
Las Figuras 3.13 y 3.14 muestran las series de tiempo del registro original y el compatibilizado en las frecuencias donde se observa la mayor modificación del registro. La mayor diferencia se puede observar entre los 10 y 55 segundos del registro, donde la amplitud de la aceleración es mayor, comparado con otros sectores del registro. En la Figura 3.14 se observan las series de tiempo de aceleración del registro original y del registro compatibilizado al espectro de la norma chilena, entre 10 y 32 segundos aproximadamente, para poder visualizar de mejor manera la diferencia que existe entre el registro original y el registro modificado.



**Figura 3.12:** Series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento de registro de Concepción Centro Longitudinal (azul) y de registro compatibilizado a espectro de diseño de la norma NCh433 (rojo).



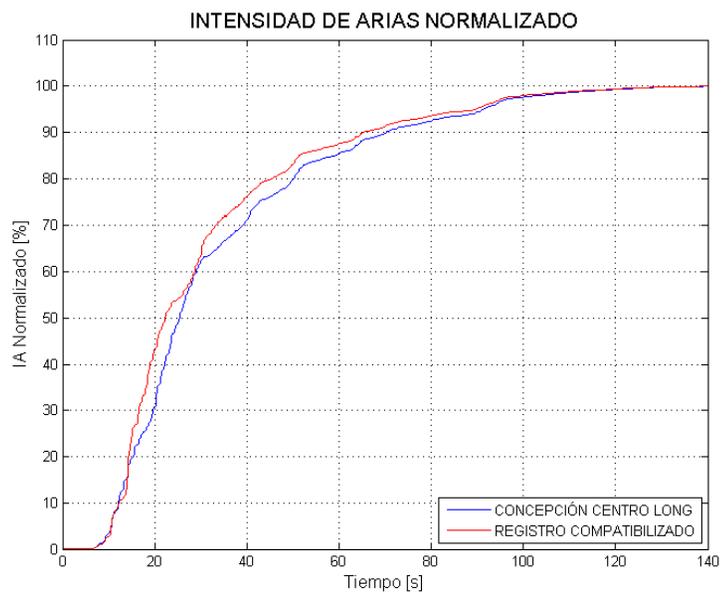
**Figura 3.13:** Series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento de registro de Concepción Centro Longitudinal (azul) y de registro compatibilizado a espectro de diseño de la norma NCh433 (rojo), ampliadas en donde se observa la mayor modificación del registro.



**Figura 3.14:** Series de tiempo de aceleración de registro de Concepción Centro Longitudinal (azul) y de registro compatibilizado a espectro de diseño de la norma NCh433 (rojo), ampliadas para observar de mejor manera la modificación del registro.

Se puede apreciar de la Figura 3.14, que el registro compatibilizado al espectro de la norma chilena conserva cierta semejanza al registro original, sin embargo, en determinadas zonas se observan desfases y variaciones de amplitud, lo cual se puede ver de mejor manera entre los 16 y 20 segundos.

Finalmente se presenta la comparación de intensidad de Arias normalizado del registro de Concepción Centro Longitudinal (azul), y el registro compatibilizado (rojo), como se puede observar en la Figura 3.15, en la cual se visualiza que la distribución de energía de ambos registros es similar.



**Figura 3.15:** Intensidad de Arias normalizado, Concepción Centro Longitudinal (azul) versus registro compatibilizado a espectro de diseño de la norma NCh433 (rojo).

### 3.4.2. Espectros de respuesta mediante espectro con dos Peaks

El espectro de respuesta de aceleración con dos peaks de Ruiz y Saragoni (2008) mostrada en la ecuación (3.4), también se utiliza como target para poder realizar la compatibilización espectral de los registros de Concepción. Este espectro para una razón de amortiguamiento de 5%, considera el período del suelo, el amortiguamiento del suelo, y el período de la fuente sísmica.

Para poder realizar la compatibilización espectral, se deben calibrar las constantes del espectro para poder ajustarlo de mejor manera al espectro del registro en estudio, utilizando los valores de los períodos del espectro del registro. A partir de la Tabla 3.24 hasta la 3.27 se presentan los valores de los parámetros del espectro con dos peaks de Ruiz y Saragoni para los registros de Concepción Centro y Concepción San Pedro.

Tabla 3.24: Parámetros de espectro para registro de Concepción Centro Longitudinal.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
PGA	0.4083g
A	2.90
B	3.70
$\beta_s$	0.14
$T_s$	1.83
$T_f$	0.56

Tabla 3.25: Parámetros de espectro para registro de Concepción Centro Transversal.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
PGA	0.2922g
A	3.80
B	4.00
$\beta_s$	0.10
$T_s$	1.53
$T_f$	0.40

Tabla 3.26: Parámetros de espectro para registro de Concepción San Pedro Longitudinal.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
PGA	0.6066g
A	1.90
B	4.70
$\beta_s$	0.17
$T_s$	0.75
$T_f$	0.29

Tabla 3.27: Parámetros de espectro para registro de Concepción San Pedro Transversal.

Parámetro	Valor
PGA	0.6659g
A	0.80
B	5.00
$\beta_s$	0.10
Ts	0.88
Tf	0.29

En la Figura 3.16 (a) se puede observar el espectro de aceleración del registro de Concepción San Pedro Longitudinal (color azul), el registro compatibilizado al espectro con dos peaks (color rojo) y el espectro con dos peaks como target (color verde). Se puede apreciar de dicha figura, que el espectro con dos peaks de Ruiz y Saragoni, se ajusta de buena manera al espectro del registro original, y está por sobre de él en la mayoría de sus períodos, sin embargo, no se logra ajustar completamente a la zona comprendida en medio de los dos peaks entre los períodos 0.8 y 1.5 segundos.

El espectro de aceleración del registro compatibilizado al espectro con dos peaks, se puede ver de mejor manera en la Figura 3.16 (b), en la cual se observa que el proceso de compatibilización se realiza correctamente, a pesar que en este caso no se tiene un espectro como el de la Norma, el cual es más regular que el de dos Peaks. La compatibilización se realiza en el rango de períodos de 0 a 5 segundos y se observa que en medio de los dos Peaks, la compatibilización no se logra completamente como en otros sectores de dicho espectro.

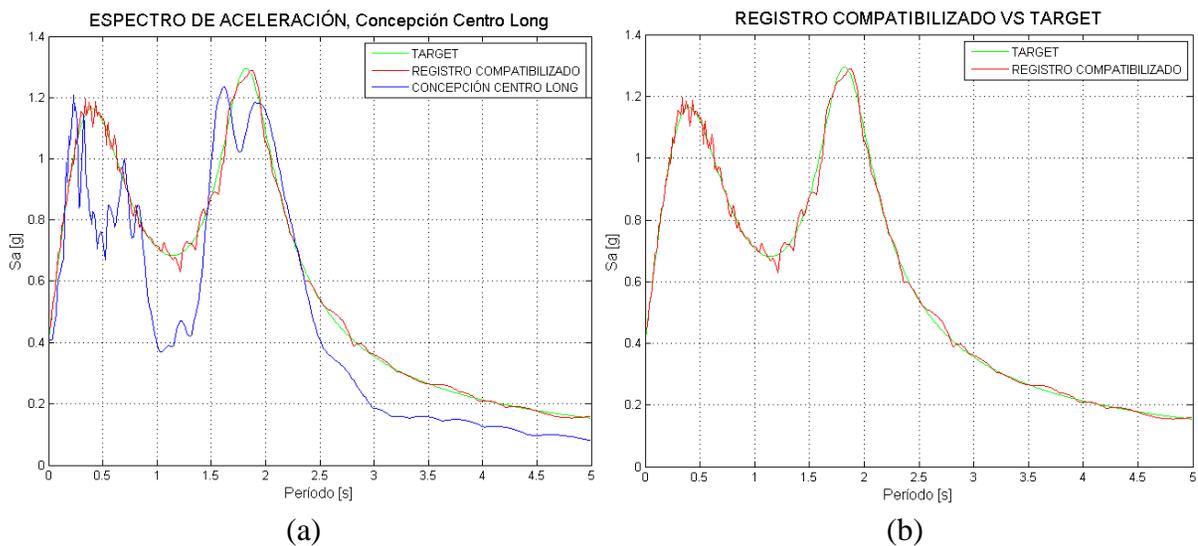
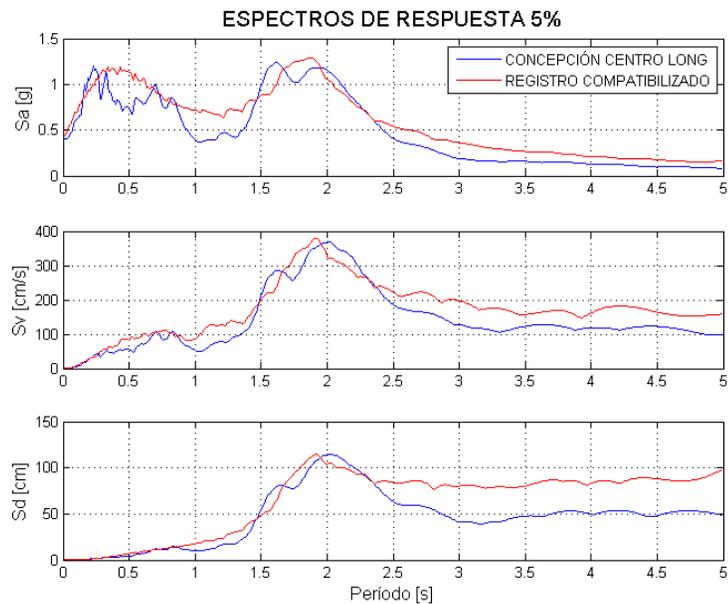


Figura 3.16: Espectros de respuesta de aceleración de Concepción Centro Longitudinal y Registro Compatibilizado a los espectros con dos peaks de Ruiz y Saragoni (2008).

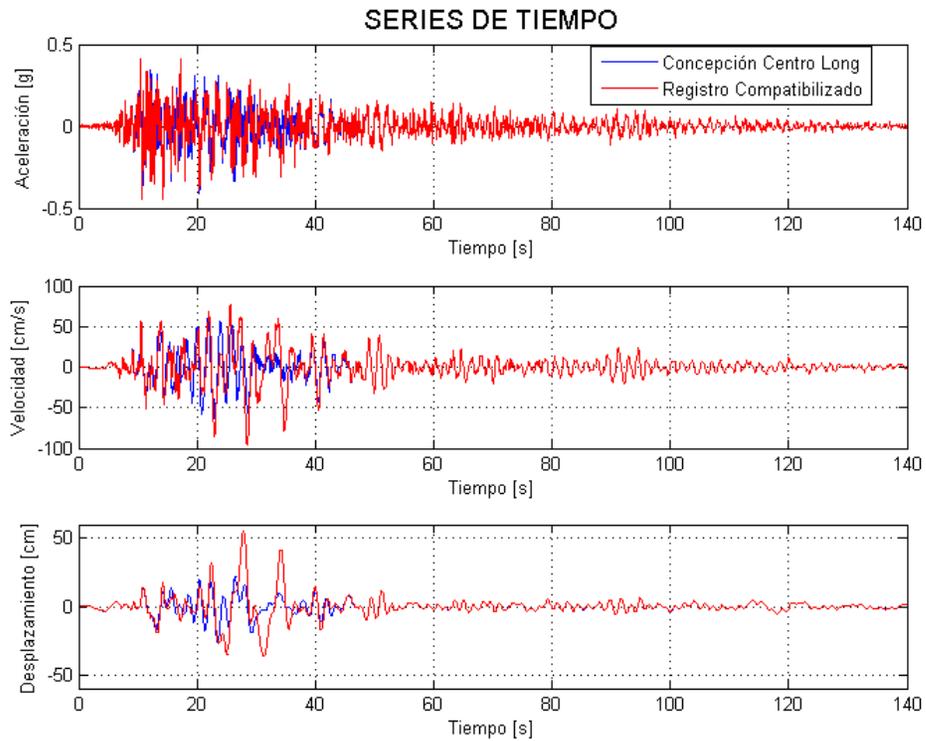
En la Figura 3.17 se muestran los espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento del registro de Concepción Centro Longitudinal (color azul), y del registro compatible al target (color rojo). Se puede visualizar de dicha figura, que los espectros de respuesta de ambos registros, son similares, debido a que el Target es parecido al espectro de aceleración del registro y también se observa que se mantienen las características del registro original a partir de la similitud de los peaks del espectro de velocidad y de desplazamiento, lo cual se puede ver entre los períodos 1.5 y 2.5 segundos aproximadamente. Además, a partir del período de 2.5 segundos, se puede apreciar que los espectros de respuesta del registro compatible se distancian con respecto al original, debido a que el target en esa zona no se ajusta completamente.



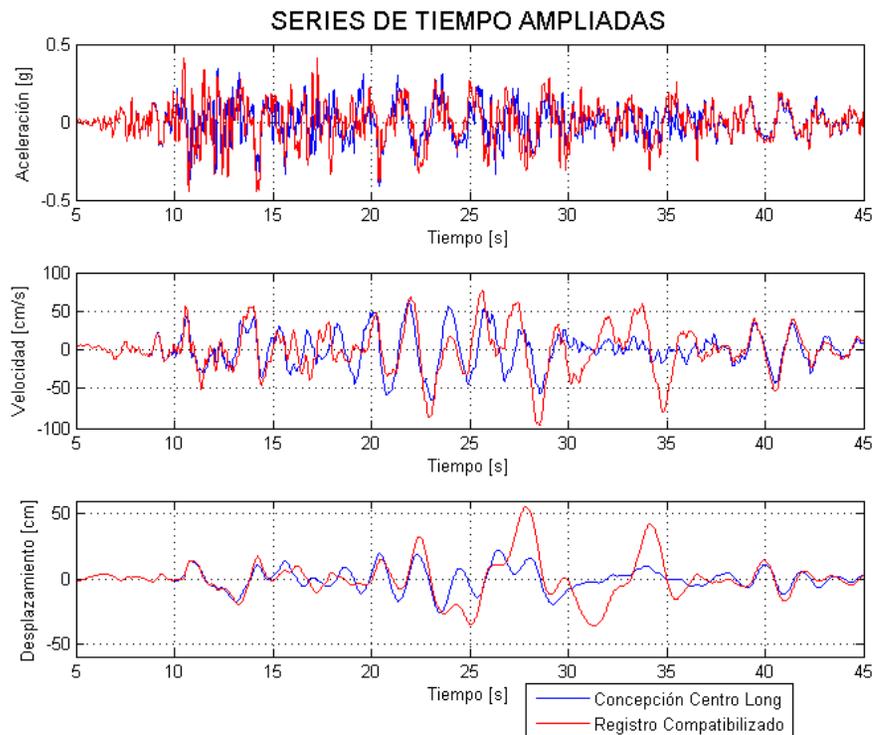
**Figura 3.17:** Espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento de registro de Concepción Centro Longitudinal (azul) y de registro compatible a espectro con dos peaks (rojo).

En la Figura 3.18 se muestran las series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento del registro de Concepción Centro Longitudinal (azul), y el registro compatible al target (rojo). Al igual que en la sección anterior, se desprende de la figura, que las series de tiempo del registro compatible al espectro con dos peaks, son similares a las del registro original, notándose una mayor variación en zonas de mayor amplitud de las series de tiempo.

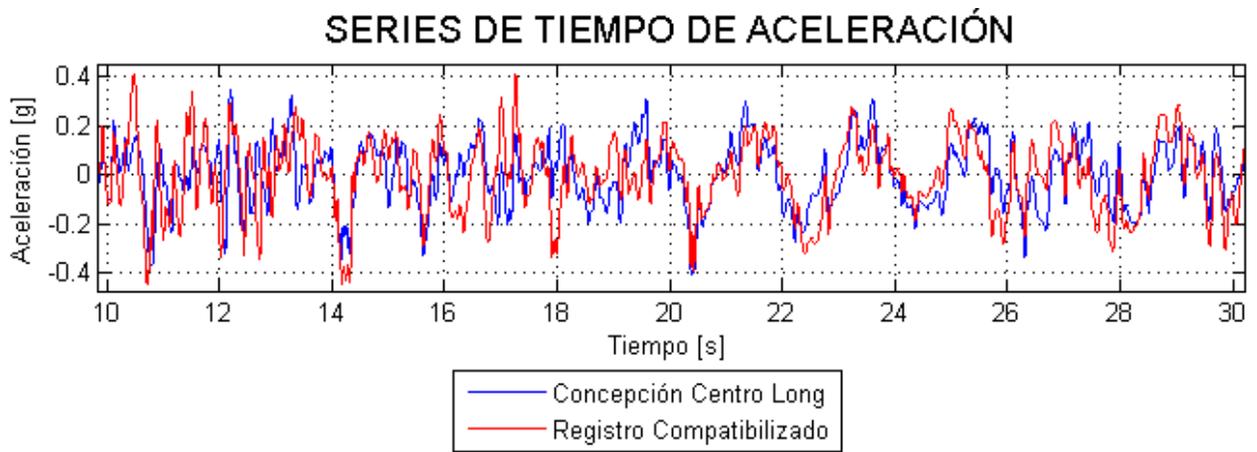
Las Figuras 3.19 y 3.20 muestran las series de tiempo del registro original y el compatible en las frecuencias donde se observa la mayor modificación del registro. La mayor diferencia se aprecia entre los 10 y 40 segundos del registro, donde la amplitud de la aceleración es mayor, comparado con otros sectores del registro. En la Figura 3.20 se muestran las series de tiempo de aceleración del registro original y del registro compatible al espectro con dos peaks entre 10 y 30 segundos aproximadamente, para poder visualizar de mejor manera la diferencia que existe entre el registro original y el registro modificado.



**Figura 3.18:** Series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento de registro de Concepción Centro Longitudinal (azul) y de registro compatibilizado a espectro con dos peaks de Ruiz y Saragoni (rojo).



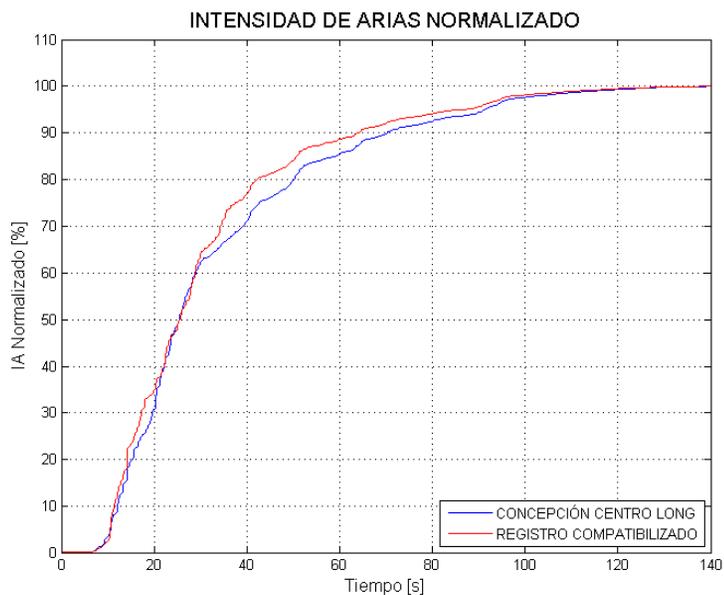
**Figura 3.19:** Series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento de registro de Concepción Centro Longitudinal (azul) y de registro compatibilizado a espectro con dos peaks (rojo), ampliadas en donde se observa la mayor modificación del registro.



**Figura 3.20:** Series de tiempo de aceleración de registro de Concepción Centro Longitudinal (azul) y de registro compatibilizado a espectro con dos peaks (rojo), ampliadas para observar de mejor manera la modificación del registro.

A partir de la Figura 3.20 se puede apreciar que el registro compatibilizado al espectro con dos peaks, conserva de buena manera la respuesta y la semejanza al registro original. Sin embargo, se observa cierto aumento de amplitud en algunas zonas, como por ejemplo entre los 10 y 12 segundos y también entre los 16 y 18 segundos.

Finalmente se presenta la comparación de intensidad de Arias normalizado del registro de Concepción Centro Longitudinal (azul), y el registro compatibilizado (rojo), como se puede observar en la Figura 3.21, en la cual se aprecia que la distribución de energía de ambos registros es similar.



**Figura 3.21:** Intensidad de Arias normalizado, Concepción Centro Longitudinal (azul) versus registro compatibilizado a espectro con dos peaks (rojo).

### 3.4.3. Resultados de Concepción Centro

Los resultados obtenidos a partir del registro de Concepción Centro (Registro Real) y el registro compatibilizado (Registro Mod.), al espectro de la Norma NCh433 y espectro con dos peaks de Ruiz y Saragoni (2008), se presentan en las Tablas 3.28 y 3.29, donde el proceso de compatibilización se realiza hasta la frecuencia de 32 [Hz].

La abreviación del registro en las Tablas es:

Conce CL: Concepción Centro Longitudinal.

Conce CT: Concepción Centro Transversal.

Tabla 3.28: Comparación de propiedades para los registros de Concepción Centro con el espectro de la Norma NCh433 como target.

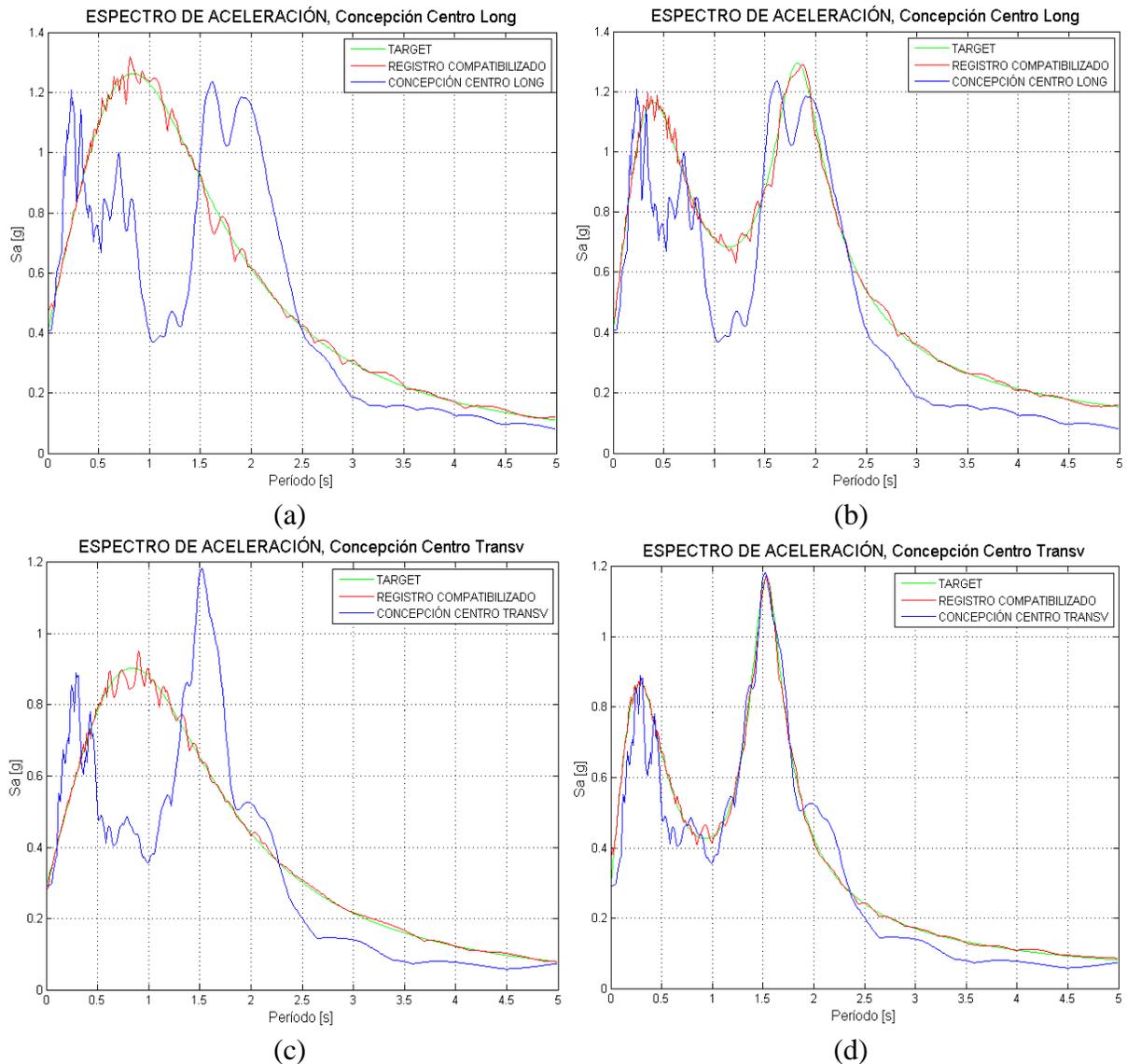
Registro, Matlab y Target		Propiedades + 32Hz (Norma NCh433)				Error [%]
		PGA [g]	IA [cm/s]	IH [cm]	PD [cm*s]	M vs Target
Conce CL 2010	Registro Real	0.4083	910.269	180.804	51.088	3.8028
	Registro Mod.	0.4775	1061.579	202.425	57.637	
	Target	0.4236				
Conce CT 2010	Registro Real	0.2922	593.091	145.226	21.909	2.4970
	Registro Mod.	0.2839	615.294	138.004	23.104	
	Target	0.3032				

Tabla 3.29: Comparación de propiedades para los registros de Concepción Centro con el espectro de Ruiz y Saragoni (2008) como target.

Registro, Matlab y Target		Propiedades + 32Hz (2Peaks)				Error [%]
		PGA [g]	IA [cm/s]	IH [cm]	PD [cm*s]	M vs Target
Conce CL 2010	Registro Real	0.4083	910.269	180.804	51.088	1.4895
	Registro Mod.	0.4463	1155.372	205.982	62.319	
	Target	0.4370				
Conce CT 2010	Registro Real	0.2922	593.091	145.226	21.909	3.808
	Registro Mod.	0.3814	701.512	132.679	27.380	
	Target	0.3228				

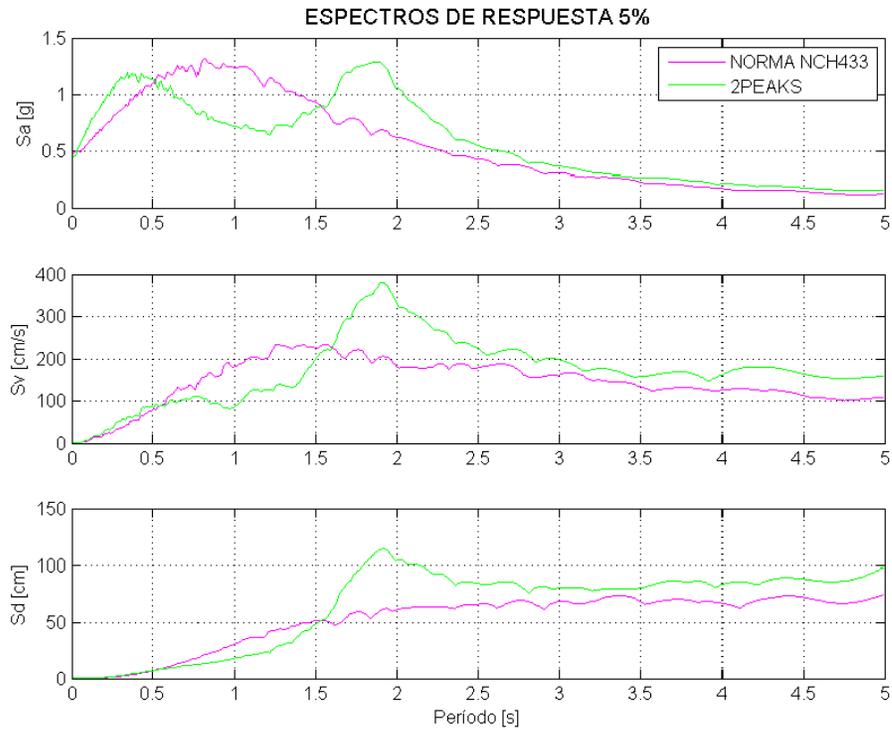
A partir de las tablas anteriores es posible apreciar que en la mayoría de los casos, los parámetros sísmicos son similares tanto para los registros reales como para los compatibilizados al espectro de la norma chilena y al de dos peaks, sin embargo, se observan valores mayores para el caso de los registros compatibilizados al espectro con dos peaks.

A continuación se presentan en la Figura 3.22 los espectros de los registros compatibilizados al espectro de la norma chilena y también al espectro con dos peaks, considerando el espectro de respuesta de aceleración de los registros de Concepción Centro en su dirección Longitudinal y Transversal.

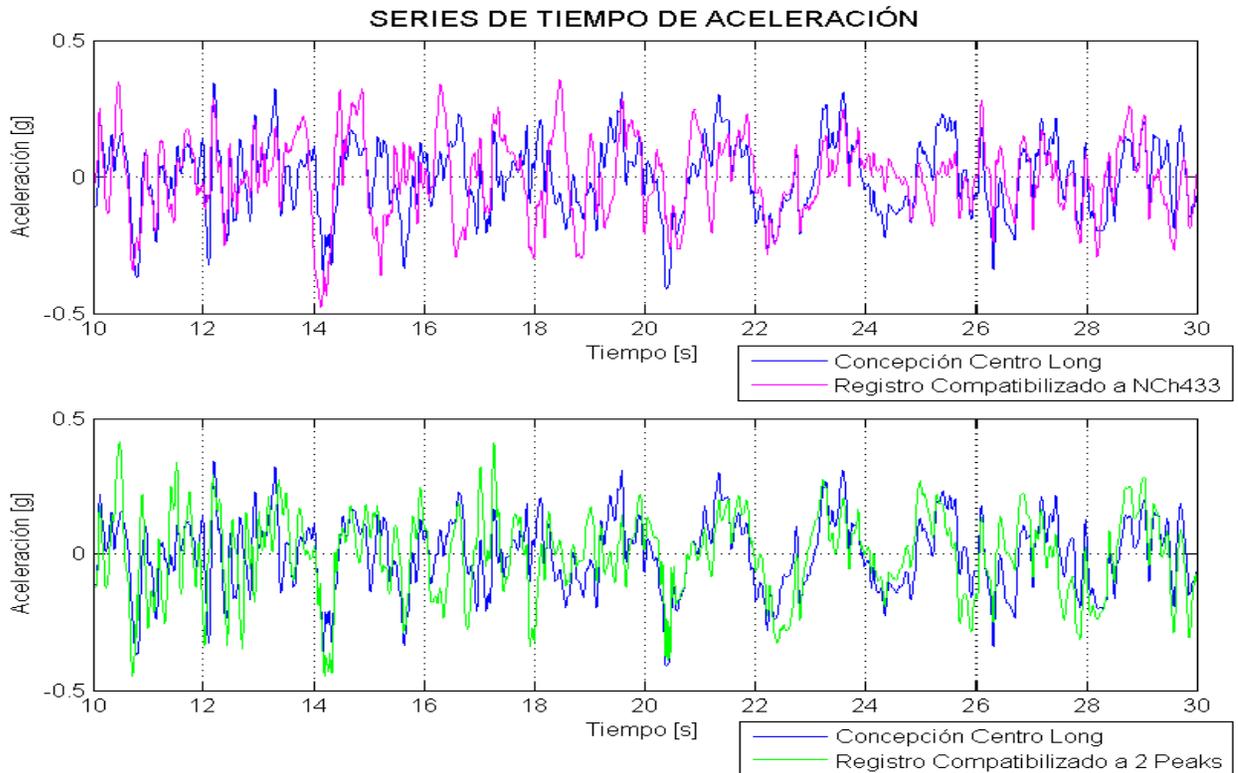


**Figura 3.22:** Comparación de espectros de Registros de Concepción Centro en sus dos direcciones. (a) Registro Longitudinal compatibilizado a Norma. (b) Registro Longitudinal compatibilizado a espectro con dos Peaks. (c) Registro Transversal compatibilizado a Norma. (d) Registro Transversal compatibilizado a espectro con dos Peaks.

A partir de los resultados anteriores es posible realizar una comparación gráfica de los espectros de respuesta de los registros compatibilizados al espectro de la norma chilena y al espectro con dos peaks. En la Figura 3.23 se puede observar la comparación de los espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento de los registros compatibilizados a ambos espectros. Se aprecia de dicha figura, como el espectro compatibilizado a la norma elimina la energía asociada a los período entre 1.5 y 2.5 segundos, observándose un desplazamiento menor en comparación con el espectro con dos peaks. La Figura 3.24 muestra el registro original y los registros compatibilizados a ambos espectros para un período de tiempo donde se observa de mejor manera la diferencia entre las series de tiempo. Para el caso del registro compatibilizado al espectro con dos peaks se conserva de mejor manera la respuesta y la semejanza entre el registro original y el registro compatibilizado.



**Figura 3.23:** Espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento de registro compatibilizado a norma NCh433 y de registro compatibilizado a espectro con dos peaks de Ruiz y Saragoni (2008).



**Figura 3.24:** Series de tiempo de aceleración de registro de Concepción Centro Longitudinal y de registro compatibilizado a espectro de Norma NCh433 y a espectro con dos peaks.

### 3.4.4. Resultados de Concepción San Pedro

Los resultados obtenidos a partir del registro de Concepción San Pedro (Registro Real), y el registro compatibilizado al espectro de la Norma NCh433 y espectro con dos peaks (Registro Mod.), se presentan en las Tablas 3.30 y 3.31, donde el proceso de compatibilización se realiza hasta la frecuencia de 32 [Hz].

La abreviación del registro en las Tablas es:

Conce SPL: Concepción San Pedro Longitudinal.

Conce SPT: Concepción San Pedro Transversal.

Tabla 3.30: Comparación de propiedades para los registros de Concepción San Pedro con el espectro de la Norma NCh433 como target.

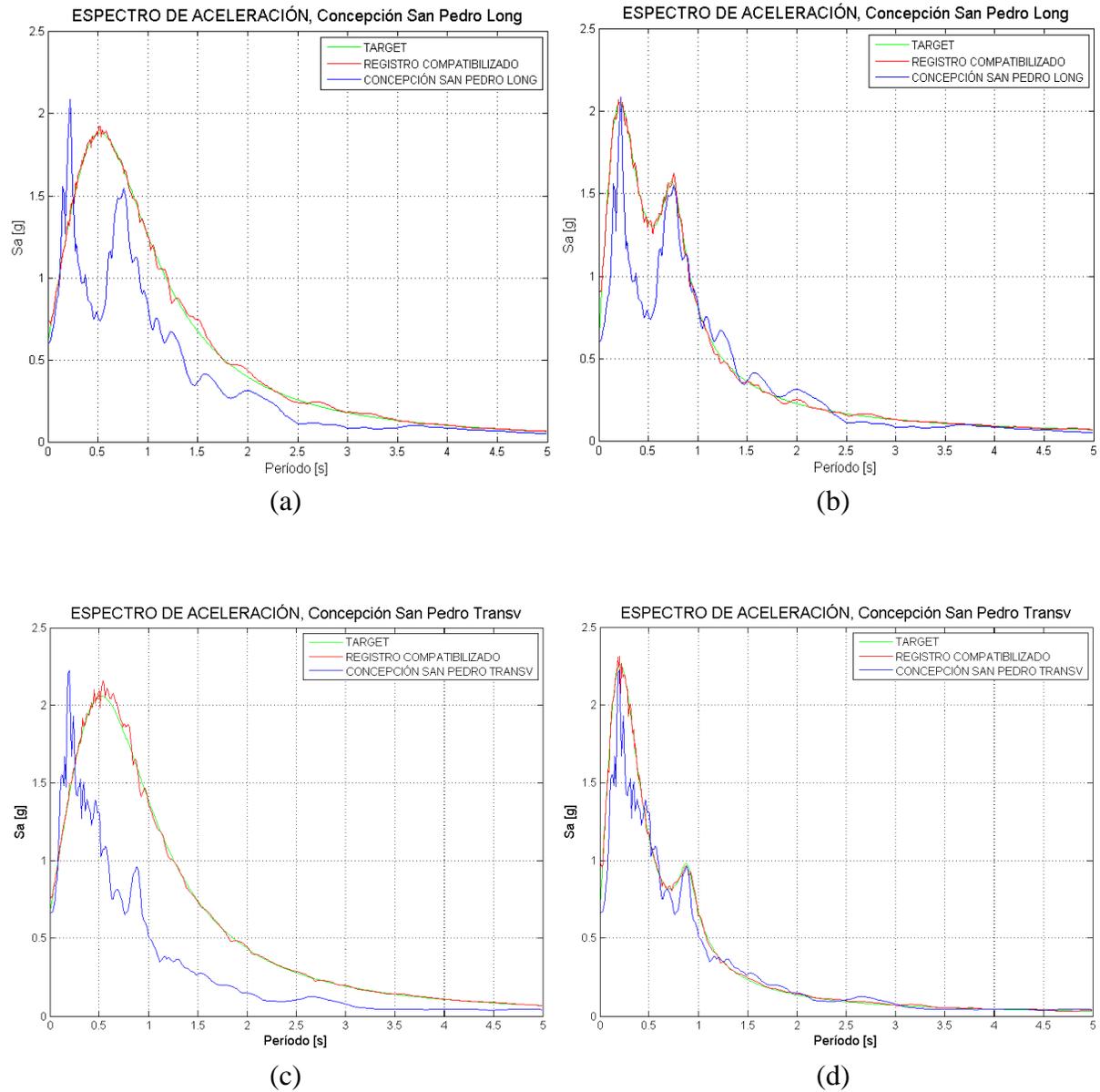
Registro, Matlab y Target		Propiedades + 32Hz (Norma NCh433)				Error [%]
		PGA [g]	IA [cm/s]	IH [cm]	PD [cm*s]	M vs Target
Conce SPL 2010	Registro Real	0.6066	1473.965	142.716	14.579	3.2503
	Registro Mod.	0.7326	2035.284	198.251	20.990	
	Target	0.6430				
Conce SPT 2010	Registro Real	0.6659	1792.539	107.845	18.712	1.8053
	Registro Mod.	0.7460	2361.609	244.478	25.734	
	Target	0.7059				

Tabla 3.31: Comparación de propiedades para los registros de Concepción San Pedro con el espectro de Ruiz y Saragoni (2008) como target.

Registro, Matlab y Target		Propiedades + 32Hz (2Peaks)				Error [%]
		PGA [g]	IA [cm/s]	IH [cm]	PD [cm*s]	M vs Target
Conce SPL 2010	Registro Real	0.6066	1473.965	142.716	14.579	4.2803
	Registro Mod.	0.9099	1903.538	143.338	18.977	
	Target	0.7100				
Conce SPT 2010	Registro Real	0.6659	1792.539	107.845	18.712	3.9946
	Registro Mod.	0.9470	2151.389	116.875	22.595	
	Target	0.7821				

A partir de las tablas anteriores es posible apreciar que en la mayoría de los casos, los parámetros sísmicos para los registros compatibilizados al espectro de la norma chilena y al de dos peaks no tienen una variación sustancial con respecto a los parámetros de los registros originales, sin embargo, se observan valores mayores para el caso de los registros compatibilizados al espectro de la Norma NCh433, en cuanto a la Intensidad de Arias, Intensidad de Housner y Potencial Destructivo, mientras que la aceleración máxima del suelo es mayor para los registros compatibilizados al espectro con dos peaks, debido a que el programa no ajusta bien el PGA para Targets que tienen alta pendiente en sus períodos iniciales.

A continuación en la Figura 3.25 se muestran los registros compatibilizados para el espectro de la norma chilena y para el espectro con dos peaks, considerando el espectro de respuesta de aceleración de los registros de Concepción San Pedro en su dirección Longitudinal y Transversal.



**Figura 3.25:** Comparación de espectros de Registros de Concepción San Pedro en sus dos direcciones. (a) Registro Longitudinal compatibilizado a Norma. (b) Registro Longitudinal compatibilizado a espectro con dos Peaks. (c) Registro Transversal compatibilizado a Norma. (d) Registro Transversal compatibilizado a espectro con dos Peaks.

### 3.4.5. Estimador Misfit

En secciones anteriores se ha estudiado la diferencia que existe entre el target y el espectro de aceleración del registro compatibilizado como un error en forma de desajuste espectral promedio, sin embargo, una comparación importante que se debe realizar, es la diferencia entre las series de tiempo de aceleración entre el registro original y el registro compatibilizado al target, lo cual se puede realizar mediante el estimador Misfit ( $\chi^2$ ), debido a que este indicador es capaz de comparar las series de tiempo punto por punto con respecto al registro original. Por lo tanto, si es que se obtiene un Misfit con valor cercano a 1 o mayor, esto quiere decir que las series de tiempo son completamente diferentes, mientras que para valores cercanos a 0, significa que las series de tiempo son similares. El estimador Misfit se obtiene como:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (a_i - b_i)^2}{\sum_{i=1}^N a_i^2} \quad (3.6)$$

Donde:

$\chi^2$ : Estimador Misfit.

$a_i$ : Registro original.

$b_i$ : Registro modificado por el proceso de compatibilización espectral.

$N$ : Número de puntos del registro.

En la Tabla 3.32 se presenta la comparación de Misfit que existe entre el registro real y el registro compatibilizado, utilizando como target el espectro de la Norma NCh433 y los espectros con dos peaks de Ruiz y Saragoni (2008). También se hace la comparación del Misfit de las series de tiempo de velocidad y desplazamiento del registro real y el registro compatibilizado.

Tabla 3.32: Comparación de Misfit de registros compatibilizados a espectro de Norma NCh433 y dos Peaks.

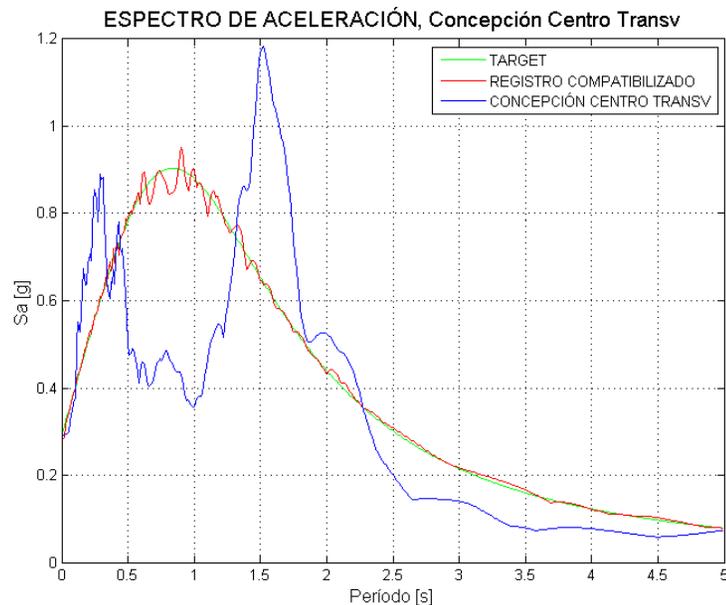
Registro	Espectro	Misfit Acel.	Misfit Vel.	Misfit Desp.
Concepción Centro Long.	NCh433	0.7198	0.7122	0.6606
	Ruiz y Saragoni	0.5765	0.7917	1.7188
Concepción Centro Transv.	NCh433	0.6416	0.7978	0.6693
	Ruiz y Saragoni	0.3467	0.4615	0.4622
Concepción San Pedro Long.	NCh433	0.5690	1.2776	0.8014
	Ruiz y Saragoni	0.3508	0.5060	0.4077
Concepción San Pedro Transv.	NCh433	0.4408	1.3912	0.9321
	Ruiz y Saragoni	0.4094	0.4576	0.3788

### 3.4.6. Discusión

Luego de realizar las comparaciones entre los registros de Concepción compatibilizados al espectro de la norma chilena y espectro con dos peaks de Ruiz y Saragoni (2008), se puede observar que las propiedades de los registros compatibilizados, es decir, PGA, Intensidad de Arias, Intensidad de Housner y Potencial Destructivo, varían dependiendo de la diferencia entre el espectro de diseño y el espectro de aceleración del registro al que se le quiere realizar el proceso de compatibilización.

Al utilizar un target que está sobre el espectro de aceleración del registro en estudio, las propiedades del registro compatibilizado aumentarán su valor, por la tendencia de subir el espectro del registro al target. Por el contrario, si se utiliza un target que está por debajo del espectro de aceleración del registro, las propiedades del registro compatibilizado disminuirán su valor dependiendo de la diferencia entre espectros.

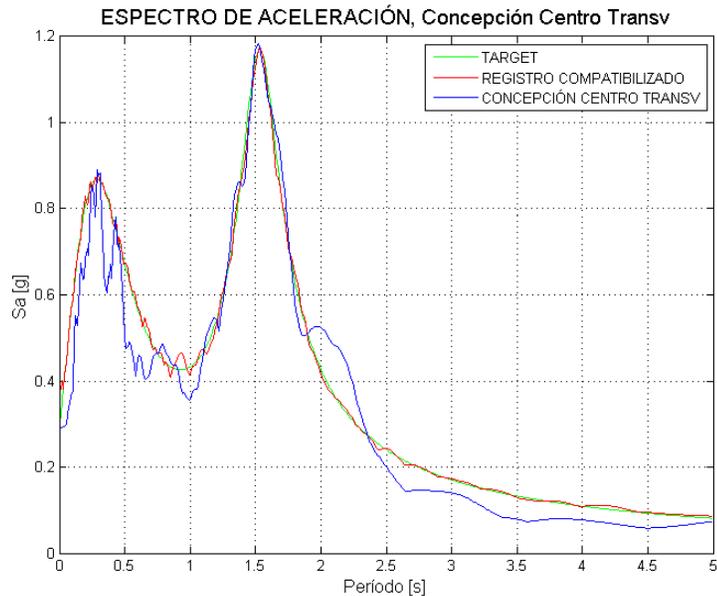
Otra diferencia importante, es cuando el espectro de aceleración del registro está por sobre y por debajo del target, lo cual se puede observar en la Figura 3.26, donde se muestra el espectro de aceleración del registro de Concepción Centro transversal.



**Figura 3.26:** Espectro de respuesta de Concepción Centro Transversal y Registro Compatibilizado al espectro de diseño de la norma NCh433.

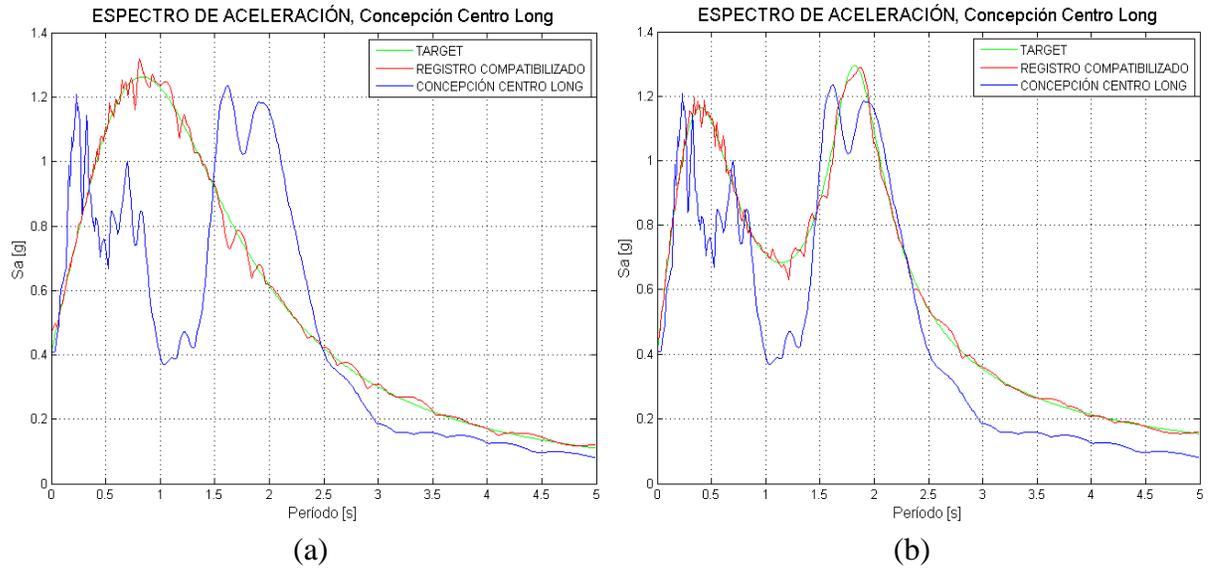
Al tener que subir y bajar el espectro del registro al target, se puede obtener un registro compatibilizado que sea modificado sustancialmente, como se observa en la Tabla 3.32, donde el Misfit entre el registro de Concepción Centro Transversal y su registro compatibilizado al espectro de la norma chilena NCh433 tiene un valor alto (0.6416), lo cual significa que el registro

se vio mayormente modificado. Por otra parte, el Misfit entre el registro de Concepción Centro Transversal y su registro compatibilizado al espectro con dos peaks, tiene un valor menor, sin embargo en este caso, como se puede observar en la Figura 3.27, el espectro de aceleración del registro es similar al Target y está mayormente por debajo del target, por lo que el registro compatibilizado se ve menos modificado.

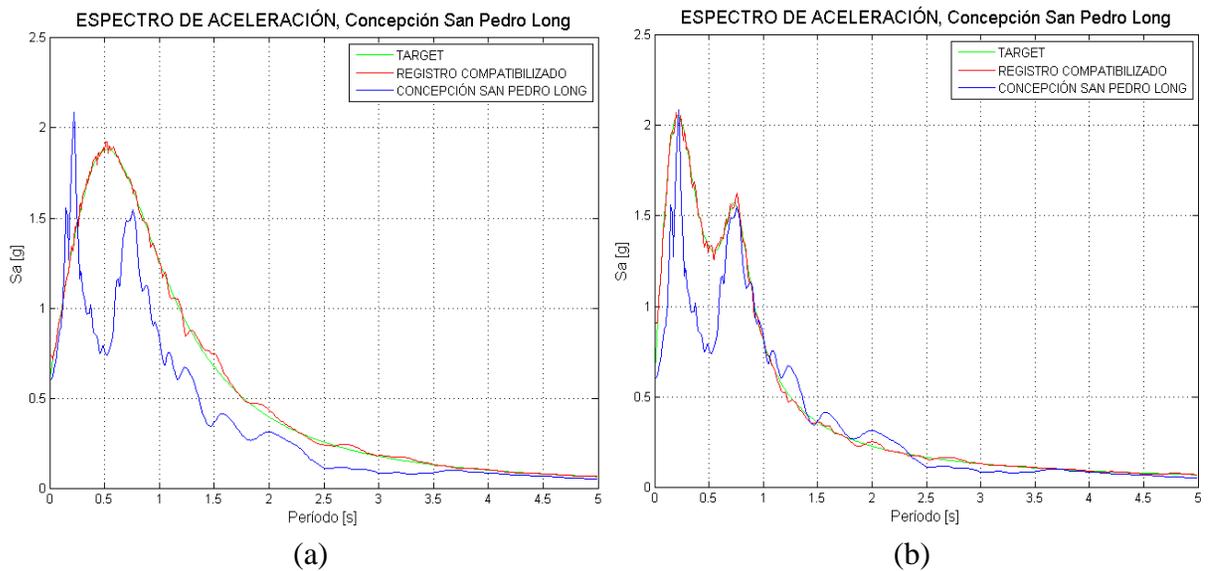


**Figura 3.27:** Espectro de respuesta de Concepción Centro Transversal y Registro Compatibilizado al espectro con dos peaks de Ruiz y Saragoni.

Observando la Tabla 3.32, los valores obtenidos de Misfit para el registro de Concepción Centro son mejores para el caso del espectro con dos peaks (son valores menores). Lo mismo se aprecia para el registro de Concepción San Pedro, es decir, los Misfit para el espectro con dos peaks es mejor que el obtenido para la norma chilena. Esto se puede explicar observando las diferencias entre el espectro de aceleración del registro y el target, ya que a mayor diferencia entre espectros, el registro compatibilizado se verá más modificado. Al observar las Figuras 3.28 y 3.29, es posible ver las diferencias entre el espectro del registro y los diferentes target utilizados para la compatibilización espectral. En la Figura 3.28 (b), se observa que el espectro con dos peaks está por encima prácticamente del espectro de aceleración del registro, sin embargo, si se hubiera modificado el espectro con dos peaks, para que quedara por debajo en algunas zonas del espectro del registro, los valores de las propiedades, probablemente habrían disminuido, y el registro compatibilizado no se hubiera visto mayormente modificado.



**Figura 3.28:** Espectro de respuesta de Registro de Concepción Centro Longitudinal y de Registros Compatibilizados. (a) Registro compatible a Norma. (b) Registro compatible a espectro con dos Peaks.

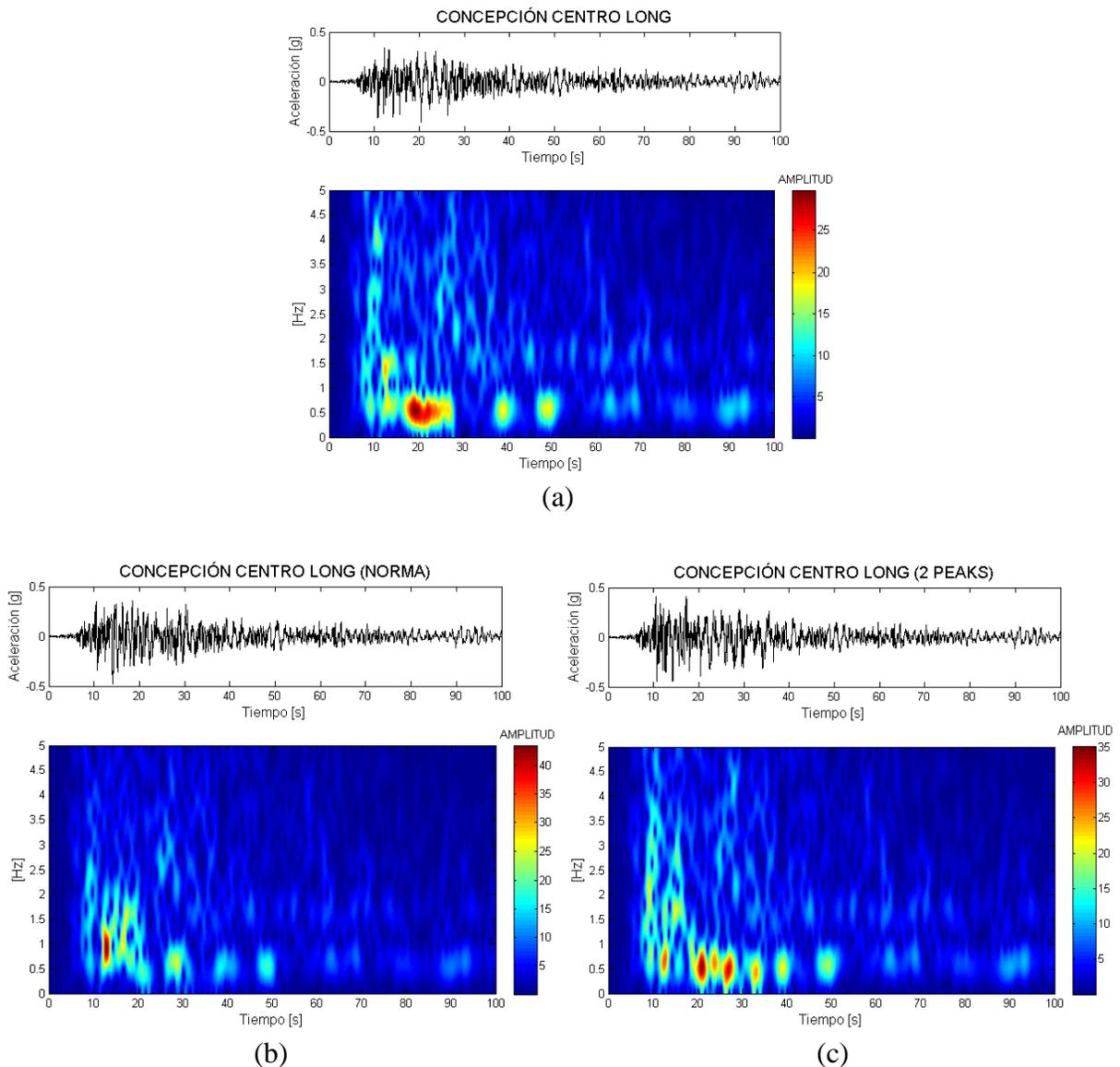


**Figura 3.29:** Espectro de respuesta de Registro de Concepción San Pedro Longitudinal y de Registros Compatibilizados. (a) Registro compatible a Norma. (b) Registro compatible a espectro con dos Peaks.

Otro factor a tener en consideración, es el registro utilizado para realizar la compatibilización espectral, ya que dependiendo del registro inicial que se utilice al realizar la compatibilización, las propiedades de éste se pueden ver sustancialmente modificadas, y se debe tener en cuenta los parámetros sísmicos originales, ya que no es lo mismo tener un registro inicial que tenga un Potencial Destructivo pequeño, a otro que tiene uno de gran magnitud.

### 3.4.7. Espectrogramas de Concepción Centro Longitudinal

En la Figura 3.30 se muestra el espectrograma del registro de Concepción Centro Longitudinal, así como también se muestra el espectrograma de los registros compatibilizados al espectro de la Norma NCh433 y al espectro con dos Peaks, de manera de tener una representación visual y una sensibilidad de las variaciones del contenido de frecuencia en función del tiempo de dichos registros. Para obtener el espectrograma, es necesario aplicar una transformada de Fourier al registro en estudio, utilizando una ventana de tiempo de 3 segundos y un traslape de las ventanas de 2.9 segundos, para obtener un nivel de resolución del espectrograma adecuado.



**Figura 3.30:** Espectrogramas de Concepción Centro Longitudinal. (a) Espectrograma de Concepción Centro Longitudinal original. (b) Espectrograma de Concepción Centro Longitudinal compatibilizado a espectro de Norma NCh433. (c) Espectrograma de Concepción Centro Longitudinal compatibilizado a espectro con dos Peaks.

Cuando ocurre un evento sísmico, el arribo de las ondas tiene un cierto orden, es decir, en primer lugar aparecen las frecuencias del terremoto, hasta que llega un momento determinado en que no se presenta demasiada energía de la fuente sísmica, debido a que el terremoto está controlado por zonas con alta concentración de esfuerzos denominadas asperezas. Cuando no llegan estas ondas sísmicas del terremoto, aparecen las vibraciones libres del suelo, que en el caso de la Figura 3.30 (a), se pueden apreciar en el intervalo de tiempo del espectrograma donde se observa mayor amplitud (entre el intervalo de 17 y 28 segundos aproximadamente), para el período aproximado de 2 segundos (0.5 [Hz]).

Al observar la Figura 3.30 (b) y (c), es posible ver que las fases de llegada de las ondas de los registros compatibilizados tienen un comportamiento similar al registro real, sin embargo, es posible ver que para el registro compatibilizado al espectro de la norma chilena, las vibraciones del suelo son en el período aproximado de 1 segundo, mientras que el espectro compatibilizado al espectro con dos peaks tiene un período aproximado de 2 segundos. Esto se puede explicar debido a la diferencia espectral entre el espectro del registro real y de los registros compatibilizados, en los cuales se tiene una diferencia evidente para el caso del espectro de diseño de la norma chilena, mientras que para el espectro con dos peaks, el desajuste espectral es menor y la forma de los espectros es similar.

La importancia de los espectrogramas es que dan una mejor imagen del contenido de frecuencias en diferentes instantes del terremoto, a diferencia de tener solamente el espectro en el cual no se sabe en qué orden del tiempo llegan las señales. Por lo tanto, se puede tener una sensibilidad de cuanto varía en el tiempo la llegada de la onda del terremoto, siendo esto importante para realizar un análisis en forma no lineal.

# CAPÍTULO 4. BASE DE DATOS DE REGISTROS COMPATIBILIZADOS

Luego de realizar diversos estudios sobre el proceso de compatibilización espectral, se seleccionan 25 registros de aceleración en su dirección horizontal, a partir del catálogo de terremotos realizado en el trabajo de título de Jorquera (2014), el cual consiste en la recopilación, almacenamiento y manipulación de registros sísmicos chilenos (desde 1981 hasta 2010 que se encuentran en un rango de PGA entre 0.05g y 1g), y el cálculo de sus parámetros sísmicos (PGA, Intensidad de Arias, Potencial Destructivo, etc).

La información necesaria para crear el catálogo de terremotos de Jorquera (2014), fue obtenida principalmente desde el Centro Sismológico Nacional (CSN), y la Red Nacional de Acelerógrafos (RENADIC), del departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, destinada a registrar terremotos chilenos para fines de investigación.

El almacenamiento de la información recopilada y manipulada por Jorquera (2014), se realiza utilizando el programa computacional Matlab, en base a estructuras (struct), los cuales son arreglos que permiten guardar distintos tipos de datos (struct, string, array, etc).

A partir de los datos estudiados, analizados y obtenidos, Jorquera crea el catálogo de terremotos, el cual organiza los registros de aceleración con sus respectivos parámetros sísmicos instrumentales que se calculan mediante funciones programadas en Matlab.

## 4.1. TARGETS UTILIZADOS

Para poder realizar la compatibilización espectral de los registros seleccionados a partir del catálogo de terremotos de Jorquera (2014), se utiliza el espectro de la Norma NCh 433 Of. 96 (NCh433) y el espectro con dos Peaks de Ruiz y Saragoni (2008), los cuales se generan para diferentes niveles de PGA, de manera de obtener registros compatibilizados que abarquen un amplio rango de aceleraciones máximas del suelo (PGA efectivo,  $PGA_{eff}$ ).

Los niveles de PGA se seleccionan en dos grupos, de modo de tener un grupo que abarca distintos niveles de aceleración máxima del suelo, y otro que se adecue a los valores de la Norma NCh433 (aceleración efectiva máxima,  $A_0$ ).

#### 4.1.1. Varios niveles de PGA

El primer grupo de PGA efectivo que se considera, abarca un amplio rango desde 0.1g hasta 1.4g:

$$PGA_{eff} = [0.1g, 0.2g, 0.4g, 0.6g, 0.8g, 1.0g, 1.2g, 1.4g]$$

Para generar los espectros de la Norma NCh433, utilizando el rango de aceleración máxima del suelo anterior, se utilizan los parámetros dependientes del tipo de suelo de la Norma antes mencionada, sin embargo, para poder obtener espectros con aceleración máxima del suelo igual a la aceleración efectiva máxima, se considera el parámetro S del espectro igual a 1. En la Tabla 4.1 se presentan los parámetros utilizados para generar los diferentes espectros.

Tabla 4.1: Parámetros utilizados para generar espectros a partir de la Norma NCh433.

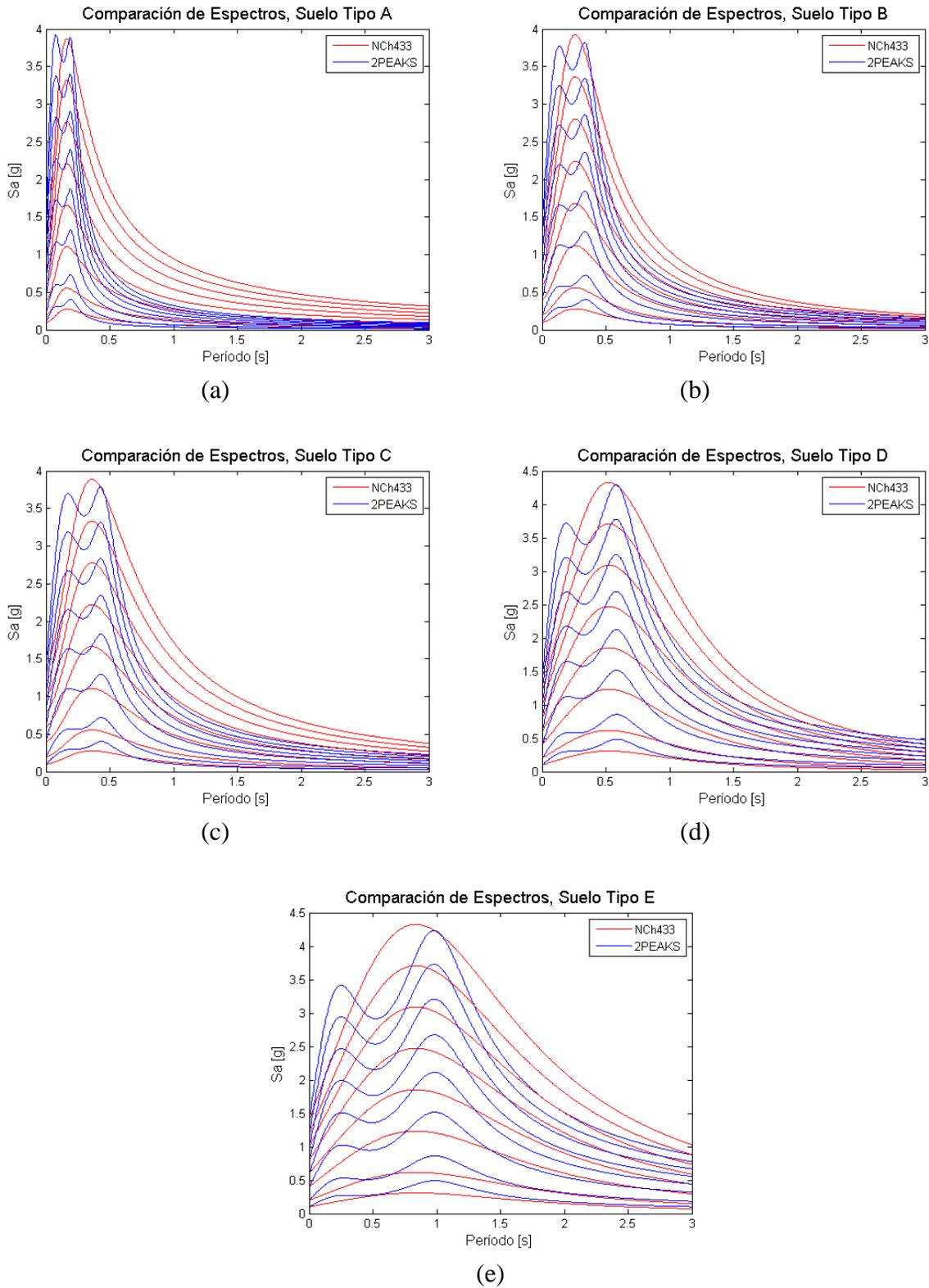
<b>Tipo de Suelo</b>	<b>S</b>	<b>T<sub>0</sub> [s]</b>	<b>p</b>
A	1.00	0.15	2.0
B	1.00	0.30	1.5
C	1.00	0.40	1.6
D	1.00	0.75	1.0
E	1.00	1.20	1.0

Teniendo en consideración los espectros que se obtienen a partir de la Norma NCh433, se generan espectros con dos peaks, los cuales se calibran de modo de tener espectros para distintos niveles de PGA similares a los de dicha Norma. En la Tabla 4.2 se muestran los parámetros que se utilizan para crear los espectros con dos peaks para diferentes niveles de PGA.

Tabla 4.2: Parámetros utilizados para generar espectros con dos peaks.

<b>Tipo de Suelo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>β</b>	<b>T<sub>S</sub> [s]</b>	<b>T<sub>F</sub> [s]</b>
A	2.45	3.20	0.25	0.20	0.100
B	2.45	3.00	0.25	0.35	0.175
C	2.45	2.90	0.25	0.45	0.225
D	3.55	2.75	0.30	0.60	0.240
E	3.79	2.48	0.30	1.00	0.333

Los espectros generados tanto para la Norma como para espectros con dos peaks se pueden ver en la Figura 4.1, en la cual se hace la comparación considerando ambos tipos de espectros (Norma en color rojo y dos peaks en color azul), para los distintos tipos de suelos de la Norma NCh433.



**Figura 4.1:** Comparación de espectros de Norma NCh433 y dos Peaks para distintos niveles de PGA y distintos tipos de suelo. (a) Espectros generados para suelo tipo A. (b) Espectros generados para suelo tipo B. (c) Espectros generados para suelo tipo C. (d) Espectros generados para suelo tipo D. (e) Espectros generados para suelo tipo E.

#### 4.1.2. Niveles de PGA de Norma

El segundo grupo de aceleración efectiva máxima que se considera, abarca los que establece la Norma NCh433, es decir:

$$A_0 = [0.2g, 0.3g, 0.4g]$$

Para obtener espectros compatibles con los espectros que establece la Norma, se consideran sus parámetros los cuales se puede ver en la Tabla 4.3. En este caso el parámetro S si varía de acuerdo al tipo de suelo, por lo tanto, la aceleración máxima del suelo es levemente diferente a la aceleración efectiva máxima.

Tabla 4.3: Parámetros dependientes del tipo de suelo de la Norma NCh433.

<b>Tipo de Suelo</b>	<b>S</b>	<b>T<sub>0</sub> [s]</b>	<b>p</b>
A	0.90	0.15	2.0
B	1.00	0.30	1.5
C	1.05	0.40	1.6
D	1.20	0.75	1.0
E	1.30	1.20	1.0

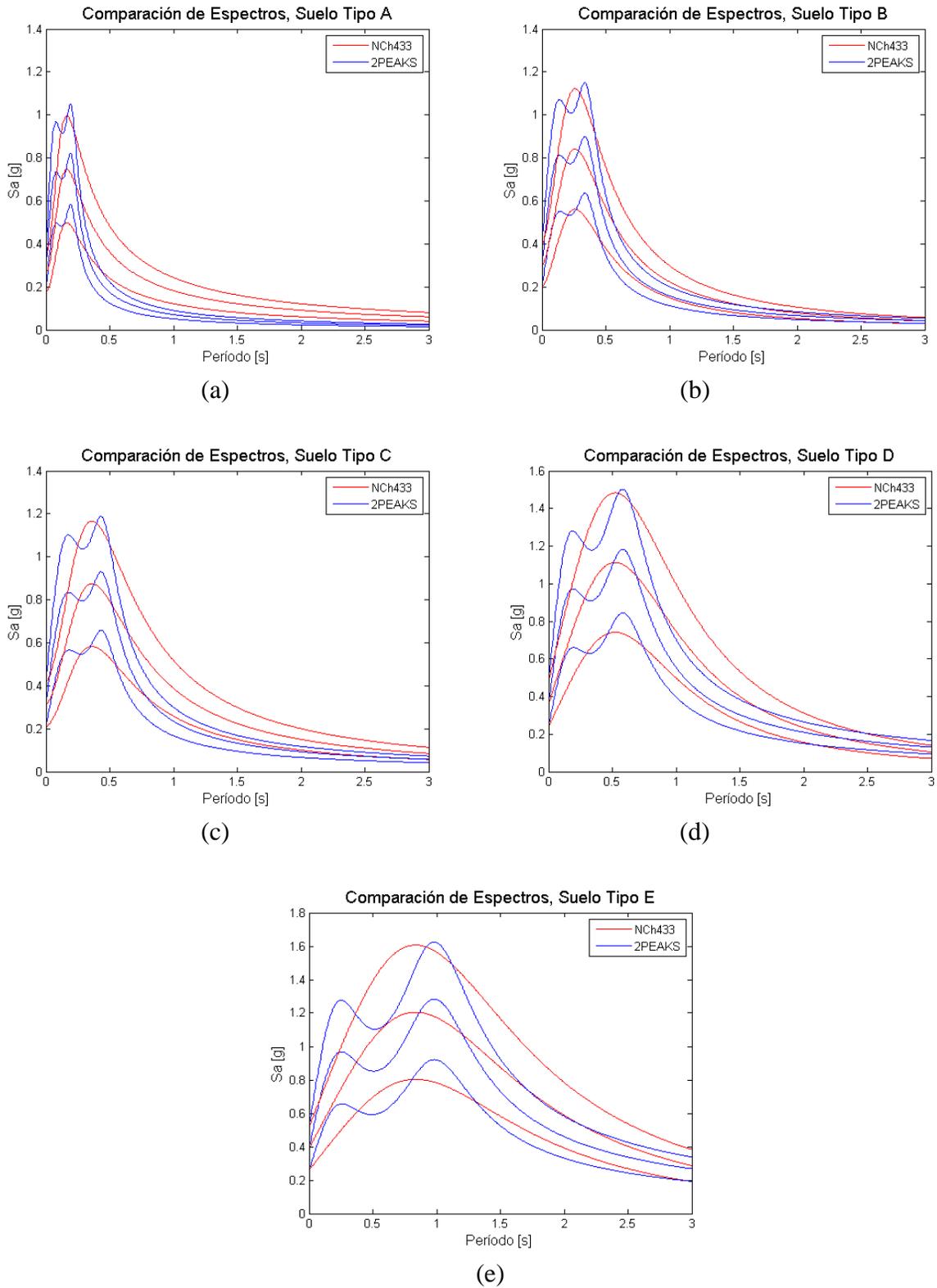
Los espectros con dos peaks se calibran para generar espectros similares a los de la Norma y poder obtener registros compatibilizados a espectros similares. En la Tabla 4.4 se muestran los parámetros utilizados para la generación de espectros con dos peaks. La diferencia con respecto a la Tabla 4.2 radica en las constantes A y B las cuales son diferentes.

Tabla 4.4: Parámetros utilizados para generar espectros con dos peaks.

<b>Tipo de Suelo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>β</b>	<b>T<sub>S</sub> [s]</b>	<b>T<sub>F</sub> [s]</b>
A	2.00	2.90	0.25	0.20	0.100
B	2.00	2.90	0.25	0.35	0.175
C	2.00	2.80	0.25	0.45	0.225
D	2.80	2.75	0.30	0.60	0.240
E	3.10	2.48	0.30	1.00	0.333

En la Figura 4.2 se puede ver la comparación de los espectros con dos peaks y de la Norma para los diferentes tipos de suelos, considerando las aceleraciones efectivas máximas de la Norma NCh433. En los gráficos se puede observar que el PGA de los espectros es diferente a la aceleración efectiva máxima considerada, lo cual se explica por el parámetro S, el cual aumenta o disminuye el PGA del espectro dependiendo del tipo de suelo que se utilice (a excepción del suelo tipo B, en el cual S=1).

En anexos se presenta la discretización efectuada para este trabajo de los espectros generados como Target, para los niveles de PGA de la Norma Chilena, utilizando un rango de períodos entre 0 y 5 segundos aproximadamente (ANEXO C).



**Figura 4.2:** Comparación de espectros de Norma NCh433 y dos Peaks para niveles de PGA de Norma. (a) Espectros generados para suelo tipo A. (b) Espectros generados para suelo tipo B. (c) Espectros generados para suelo tipo C. (d) Espectros generados para suelo tipo D. (e) Espectros generados para suelo tipo E.

## 4.2. BASE DE DATOS

La base de datos de registros compatibilizados se realiza a partir de 25 registros de aceleración horizontales seleccionados del catálogo de Jorquera (2014). Para la elección de los registros se toman en cuenta distintos niveles de PGA, teniendo en consideración el potencial destructivo de cada registro para poder observar el comportamiento al realizar el proceso de compatibilización espectral.

A partir de la selección de registros, se elabora una base de datos de registros compatibilizados mediante una rutina que genera un archivo de 25 estructuras, donde cada estructura tiene los siguientes campos:

- Evento: <string> indica nombre del evento. Si es un número, corresponde a la fecha más un número que indica si es un evento único (1), o es una réplica inmediata (2).
- Estacion: <string> indica el nombre de la estación.
- Registro: <array> almacena el registro.
- PGA: <double> indica la aceleración máxima del suelo [g].
- Canal: <string> indica el canal en el que se selecciona el registro.
- Muestreo: <double> indica la frecuencia de muestreo del registro.
- EspectroNorma: <struct> almacena los PGA utilizados para la compatibilización al espectro de la norma NCh433.
- Espectro2Peaks: <struct> almacena los PGA utilizados para la compatibilización al espectro con dos peaks de Ruiz y Saragoni (2008).

Para los campos “EspectroNorma” y “Espectro2Peaks”, como se menciona en su descripción, contienen los campos de PGA que se utilizan para compatibilizar los registros al espectro de la Norma NCh433 y el espectro con dos Peaks respectivamente. Se establecen dos grupos de PGA para tener distintos niveles al momento de realizar la compatibilización espectral.

El primer grupo de PGA, el cual se denomina “PGASeleccionados”, contiene diferentes niveles de PGA en un rango entre 0.1 y 1.4 [g], de modo de tener una amplia gama de registros compatibilizados a los siguientes niveles de PGA:

$$PGASeleccionados = [0.1g, 0.2g, 0.4g, 0.6g, 0.8g, 1.0g, 1.2g, 1.4g]$$

El segundo grupo se denomina “AoSeleccionados”, el cual tiene por finalidad considerar la aceleración efectiva máxima ( $A_0$ ) que se establece en la Norma NCh433, de manera de compatibilizar los registros a los espectros de dicha norma con sus propios niveles de PGA (ver esquema de base de datos en Figura 4.3):

$$AoSeleccionados = [0.2g, 0.3g, 0.4g]$$

Teniendo en consideración lo anterior, los campos de las estructuras mencionadas anteriormente son:

- PGASeleccionados: <struct> almacena error entre el target y el espectro compatibilizado.
- AoSeleccionados: <struct> almacena error entre el target y el espectro compatibilizado.

Los campos de PGA anteriores guardan estructuras de error asociado al desajuste espectral entre el Target y el espectro del registro compatibilizado. Se consideran dos niveles de error asociados al desajuste espectral: el primero se refiere a un error entre el target y el espectro del registro compatibilizado menor a un 5% para cuatro pasos de ajuste, el segundo considera un error entre un 15% y 25% (para tener un error dentro de un rango de un 20%), de modo de obtener registros compatibilizados con un mayor margen de error, de manera de poder observar que ocurre al compatibilizar los registros con un mayor nivel de desajuste espectral, tomando en cuenta un paso de ajuste. Los campos de dichas estructuras son:

- Error5: <struct> almacena los tipos de suelo de la Norma NCh433 para error de 5%.
- Error20: <struct> almacena los tipos de suelo de la Norma NCh433 para error de 20%.

Al definir el error asociado al desajuste espectral, se definen los campos de “Error5” y “Error20” (para un error de un 5% y 20% respectivamente), los cuales almacenan estructuras de los diferentes tipos de suelos de la Norma NCh 433 Of. 96, considerando el DS N° 61 (ver Figura 4.3). Las estructuras que se crean a partir del campo Error son:

- SUELOA: <struct> almacena los PGA para suelo tipo A.
- SUELOB: <struct> almacena los PGA para suelo tipo B.
- SUELOC: <struct> almacena los PGA para suelo tipo C.
- SUELOD: <struct> almacena los PGA para suelo tipo D.
- SUELOE: <struct> almacena los PGA para suelo tipo E.

Las estructuras de los distintos tipos de suelos almacenan estructuras que definen los diferentes niveles de PGA a los cuales son compatibilizados los registros. Para el caso del campo “PGASeleccionados”, se consideran 8 niveles de PGA, sin embargo, para el campo “AoSeleccionados”, se consideran 3 niveles de PGA. Para el caso “PGASeleccionados” se tiene:

- PGA1: <struct> almacena los parámetros de  $PGA1=0.1g$ .
- PGA2: <struct> almacena los parámetros de  $PGA2=0.2g$ .
- PGA3: <struct> almacena los parámetros de  $PGA3=0.4g$ .
- PGA4: <struct> almacena los parámetros de  $PGA4=0.6g$ .
- PGA5: <struct> almacena los parámetros de  $PGA5=0.8g$ .
- PGA6: <struct> almacena los parámetros de  $PGA6=1.0g$ .
- PGA7: <struct> almacena los parámetros de  $PGA7=1.2g$ .
- PGA8: <struct> almacena los parámetros de  $PGA8=1.4g$ .

Para cada nivel de PGA, se almacena el registro compatibilizado al espectro correspondiente, así como también sus parámetros, como se puede ver a continuación:

- RegistroCompatibilizado: <array> almacena el registro compatibilizado.
- PGA : <double> indica la Aceleración máxima del suelo [g].
- PGV : <double> indica la Velocidad máxima del suelo [cm/s].
- PGD : <double> indica el Desplazamiento máximo del suelo [cm].
- IA : <double> indica la Intensidad de Arias [cm/s].
- IH : <double> indica la Intensidad de Housner [cm].
- PD : <double> indica el Potencial Destructivo [cm\*s].
- No : <double> indica la Intensidad de cruces por cero [1/seg].
- Direccion : <string> indica la dirección del registro
- Ignore : <double> indica si el registro es ignorado o no.

Como se mencionó anteriormente, se seleccionan 25 registros horizontales desde el catálogo de terremotos de Jorquera (2014), los cuales fueron escogidos para diferentes niveles de PGA (en un intervalo entre 0.05g y 1.0g), y también a partir de su potencial destructivo, de manera de abarcar un amplio rango de registros desde dicho catálogo. En la Tabla 4.5 se presentan los registros para realizar la base de datos de registros compatibilizados con sus respectivos parámetros. La segunda columna (Registro Base), indica el número del registro en el orden que está el catálogo de terremotos de Jorquera, para posteriormente ordenarlo en la nueva base de datos. Para la elección se consideran registros para los tres Canales creados en el catálogo de terremotos de Jorquera (2014). En la cuarta y quinta columna se identifica el Evento y la Estación en que se registra el terremoto en su dirección respectiva. Las últimas dos columnas de la Tabla 4.5 (sexta y séptima columna), muestran la aceleración máxima del suelo (PGA) y el potencial destructivo (PD) de cada registro.

Tabla 4.5: Registros seleccionados de catálogo de terremotos Jorquera (2014).

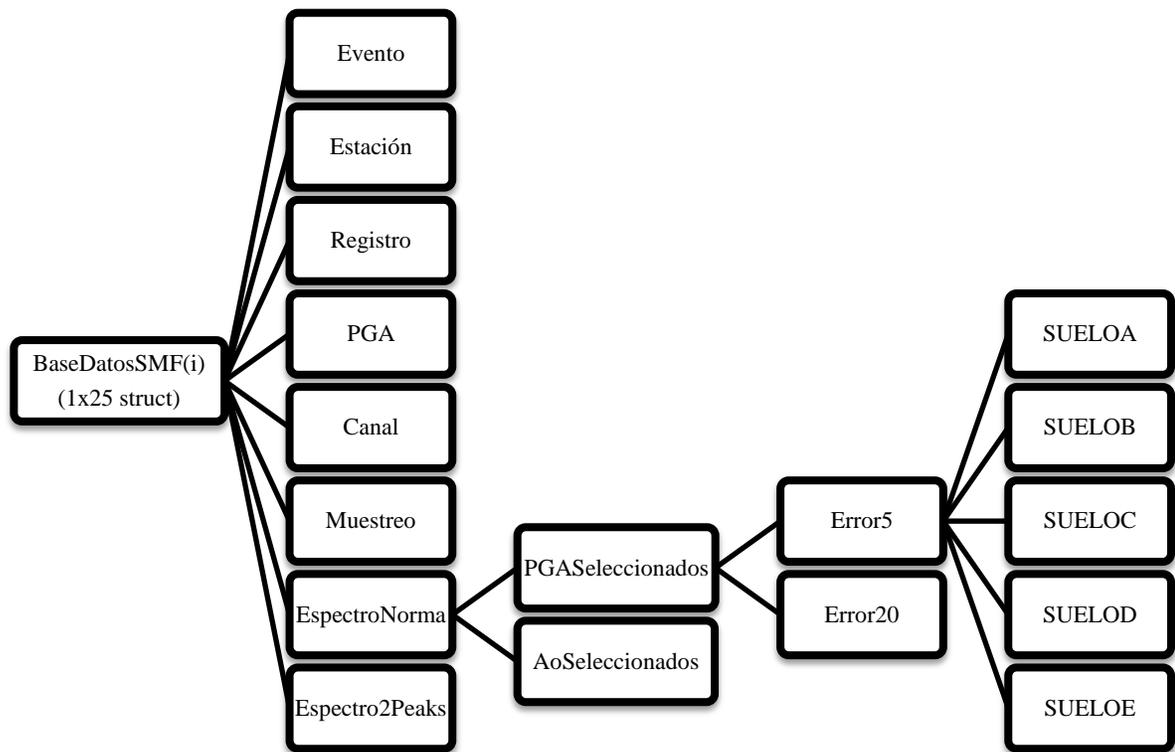
Registro	Registro Base	Canal	Evento	Estación	PGA [g]	PD [cm*s]
1	1	1	0604091	ALTO HOSPICIO	0.0545	0.0089
2	8	1	MAULE 2010	ANGOL	0.7220	18.7445
3	9	1	TOCOPILLA 2007	ANTOFAGASTA UCN	0.1280	0.2289
4	15	1	TARAPACÁ 2005	ARICA CEMENTERIO	0.2015	0.3291
5	27	1	MAULE 2010	CONCEPCIÓN	0.4083	51.0885
6	69	1	0712161	MEJILLONES CENTRAL	0.1839	0.3389
7	111	1	TOCOPILLA 2007	TOCOPILLA	0.5291	3.2275
8	120	1	MAULE 2010	VALPARAÍSO ALMENDRAL	0.2257	9.8728
9	135	1	VALPARAÍSO 1985	SAN ISIDRO	0.7224	26.1248
10	142	1	VALPARAÍSO 1985	CONSITUCCIÓN 85	0.0808	0.8439
11	165	1	8111071	LA LIGUA	0.3808	1.4052
12	166	1	8111071	PAPUDO	0.3574	0.9781
13	183	1	TOCOPILLA 2007	PB08	0.3083	2.6196
14	203	1	MAULE 2010	MELIPILLA	0.5739	5.0203
15	209	1	MAULE 2010	CONCEPCIÓN SAN PEDRO	0.6066	14.5790
16	8	2	MAULE 2010	ANGOL	0.9406	21.4024
17	84	2	0809101	PICA	0.6169	0.9637

18	132	2	VALPARAÍSO 1985	LLAYLLAY	0.4733	12.2128
19	135	2	VALPARAÍSO 1985	SAN ISIDRO	0.7034	30.2372
20	151	2	VALPARAÍSO 1985	RAPEL	0.4662	1.1626
21	180	2	TOCOPILLA 2007	PB05	0.5509	1.2260
22	203	2	MAULE 2010	MELIPILLA	0.7834	7.3740
23	12	3	0510171	ARICA	0.1574	0.0259
24	28	3	MAULE 2010	CONSTITUCIÓN	0.6447	66.8922
25	62	3	MAULE 2010	LLOLLEO	0.5611	18.3306

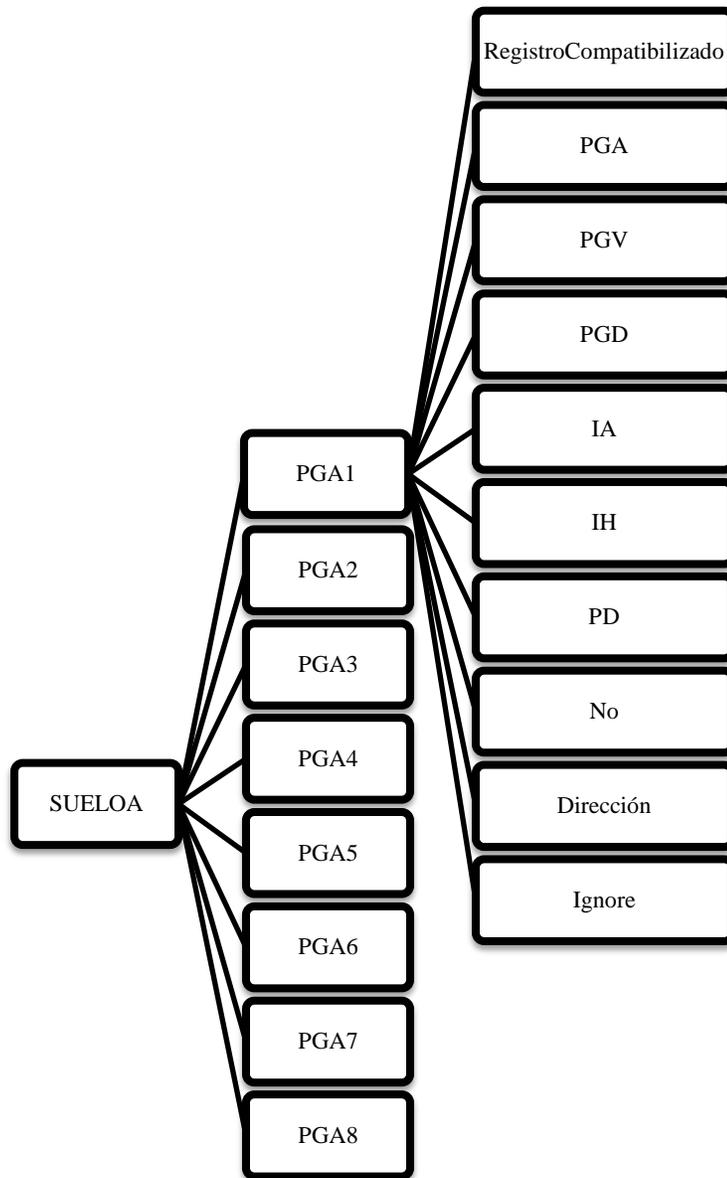
A continuación se muestra mediante dos diagramas cómo se organiza la base de datos de registros compatibilizados *BaseDatosSMF.mat*, la cual contiene la información de los registros compatibilizados al espectro con dos peaks y el espectro de la Norma NCh433.

El primer diagrama (Figura 4.3), muestra cómo se organiza la base de datos desde un comienzo, hasta los campos referidos a cada tipo de suelo al que se compatibiliza cada registro. El segundo diagrama (Figura 4.4), indica cómo se distribuye la base, desde cada tipo de suelo hasta los parámetros sísmicos de cada registro compatibilizado con su respectivo registro, para cada nivel de PGA que se utiliza en la compatibilización espectral.

A modo de ejemplo, se muestra en los diagramas el caso para el campo “PGASeleccionados”, el cual considera diferentes niveles de PGA en un rango de 0.1g hasta 1.4g, sin embargo, para el caso de “AoSeleccionados”, se consideran los niveles de PGA de la Norma NCh433.



**Figura 4.3:** Esquema de Base de Datos (primera parte).

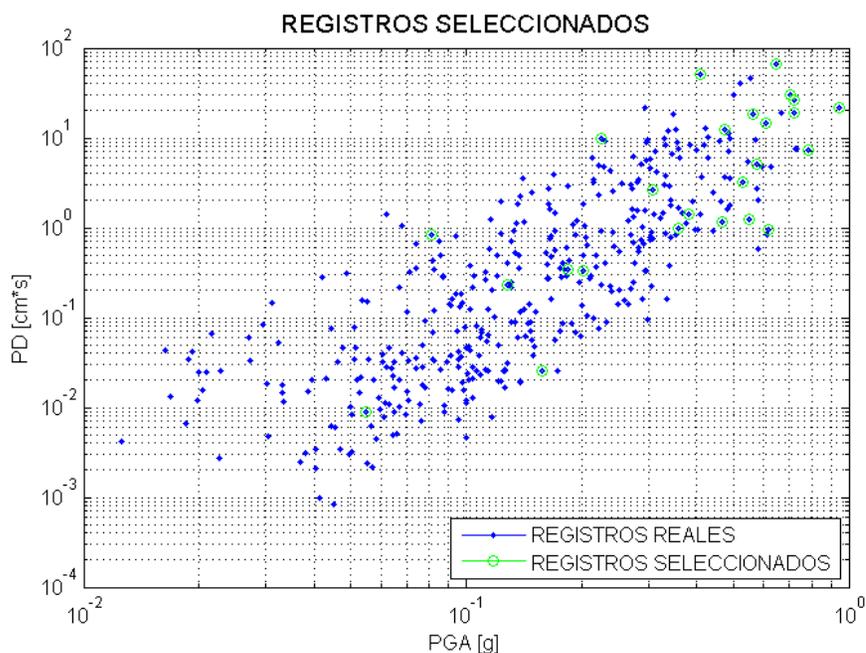


**Figura 4.4:** Esquema de Base de Datos (segunda parte).

# CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE BASE DE DATOS DE REGISTROS COMPATIBILIZADOS

La base de datos, es una herramienta que permite acceder fácilmente a los datos almacenados de los registros seleccionados a partir de la base de datos de Jorquera (2014), y de los registros compatibilizados con sus parámetros sísmicos, con lo cual es posible graficar un parámetro en función de otro, para así poder analizar la distribución de los datos. En este trabajo se realiza el estudio principalmente utilizando gráficos en escala logarítmica de Potencial Destructivo en función del PGA, para poder visualizar la dispersión de los datos. La razón por la cual se escoge el Potencial Destructivo, se debe a que refleja una clara y lógica tendencia de los datos a partir de la clasificación por fuente sismogénica para distintos tipos de suelos, y además permite caracterizar la destructividad de los terremotos (Jorquera, 2014), en desmedro de otros parámetros sísmicos, en los cuales no se puede apreciar una diferenciación de la tendencia de los datos, por el contrario, para otros parámetros se ve una tendencia más bien lineal cuando se grafica en escala logarítmica, sin discriminar entre tipos de terremotos.

En la Figura 5.1 se grafica en escala logarítmica el Potencial Destructivo en función del PGA de los registros horizontales del catálogo de terremotos de Jorquera (2014) (puntos de color azul), y también se pueden apreciar los registros seleccionados de la Tabla 4.5, para realizar la compatibilización espectral (círculos de color verde).

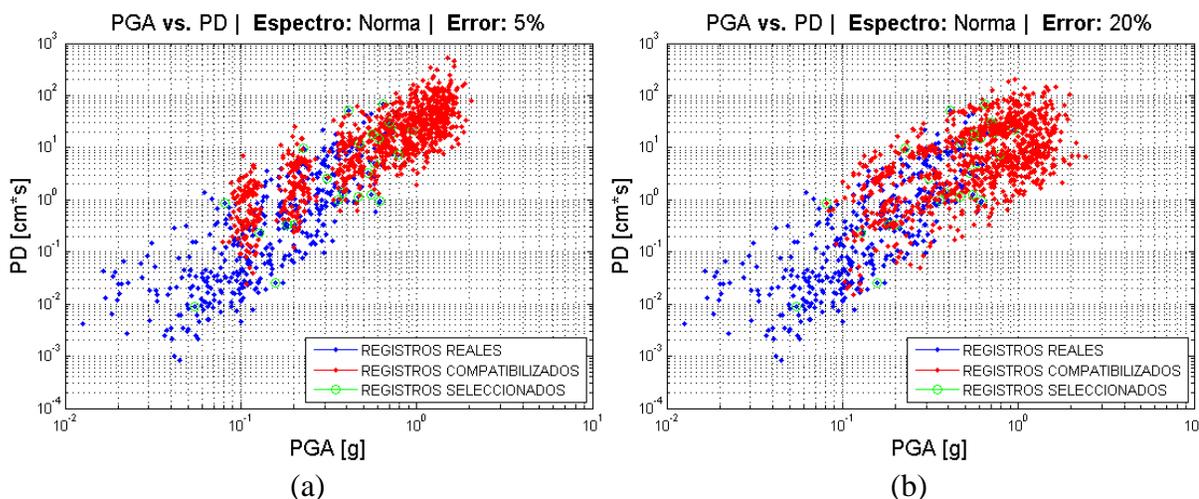


**Figura 5.1:** Potencial Destructivo en función de PGA de Registros seleccionados desde Catálogo de terremotos de Jorquera (2014).

## 5.1. ESPECTRO DE NORMA, PGA SELECCIONADOS

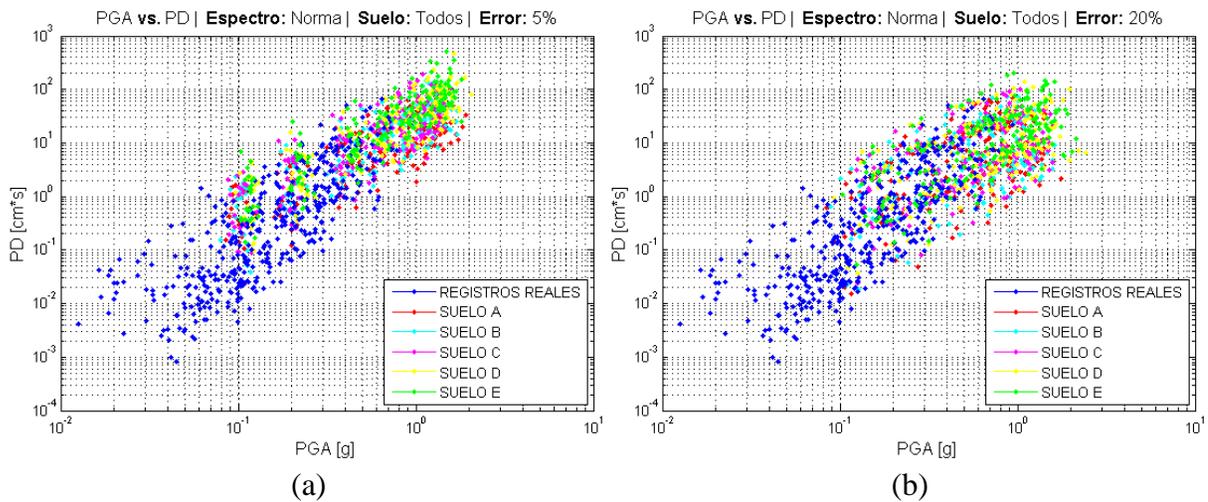
A continuación se presentan los resultados obtenidos al graficar el Potencial Destructivo en función del PGA, de todos los registros de dirección horizontal del catálogo de terremotos de Jorquera (2014), así como también los registros compatibilizados al espectro de la Norma chilena NCh 433 Of. 96 (NCh433), para los niveles de PGA de la base de datos de registros compatibilizados denominados “PGASeleccionados”, es decir, para valores de PGA que abarcan un rango entre 0.1g y 1.4g. Es importante destacar que los gráficos están en escala logarítmica, y muestran una compatibilización realizada con un 5% y 20% de error con respecto al Target utilizado, para observar la variación de la compatibilización espectral al ocupar distintos márgenes de error. Como una forma de diferenciar esto último, la disposición de los gráficos de los registros compatibilizados para un 5 % de error, se presentan al lado izquierdo, mientras que para un 20% de error se encuentran en el lado derecho.

La Figura 5.2 muestra los registros compatibilizados al espectro de la Norma (puntos de color rojo) para todos los tipos de suelos de la Norma NCh433, utilizando un 5% y 20% de error con respecto al Target. Como se puede apreciar en dicha figura, se observa una clara tendencia de los datos con respecto a los registros originales, los cuales se representan de color azul. También se puede ver que para el gráfico de error de 5%, los valores de Potencial Destructivo en función del PGA son mayores a los que se obtienen, en comparación a los resultados para un 20% de error. Una razón por la cual los resultados difieren al utilizar distintos errores para realizar la compatibilización, se debe al tipo de modificación que se le hace al registro para que sea lo más o menos parecido al Target. Al utilizar un mayor margen de error, el registro no se ve sustancialmente modificado y los resultados tienden a seguir los valores de los registros originales, sin embargo, para un menor margen de error, los registros se ven mayormente modificados para igualarse lo más posible al target.

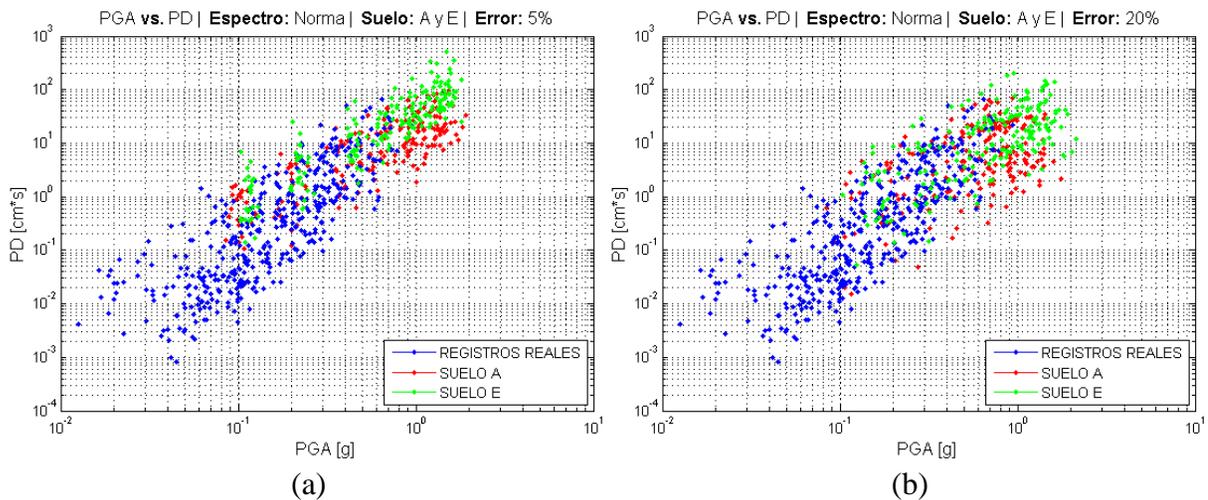


**Figura 5.2:** Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma para todos los tipos de suelos de la Norma NCh433, utilizando varios niveles de PGA. (a) Registros compatibilizados para un 5% de error con respecto al Target. (b) Registros compatibilizados para un 20% de error con respecto al Target.

A partir de la figura anterior, es posible graficar el potencial destructivo en función del PGA de los registros compatibilizados al espectro de la Norma, mediante la distinción por tipo de suelo, utilizando un 5% y 20% de error con respecto al Target. En la Figura 5.3 se muestran las compatibilizaciones para todos los tipos de suelos, diferenciándose cada uno con diferente color. Además, en la Figura 5.4 se presentan los registros compatibilizados al espectro de la norma chilena para los suelos tipo A y E, de manera de poder distinguir de mejor manera la diferencia al utilizar ambos tipos de suelos.



**Figura 5.3:** Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma para todos los tipos de Suelos de la Norma NCh433.

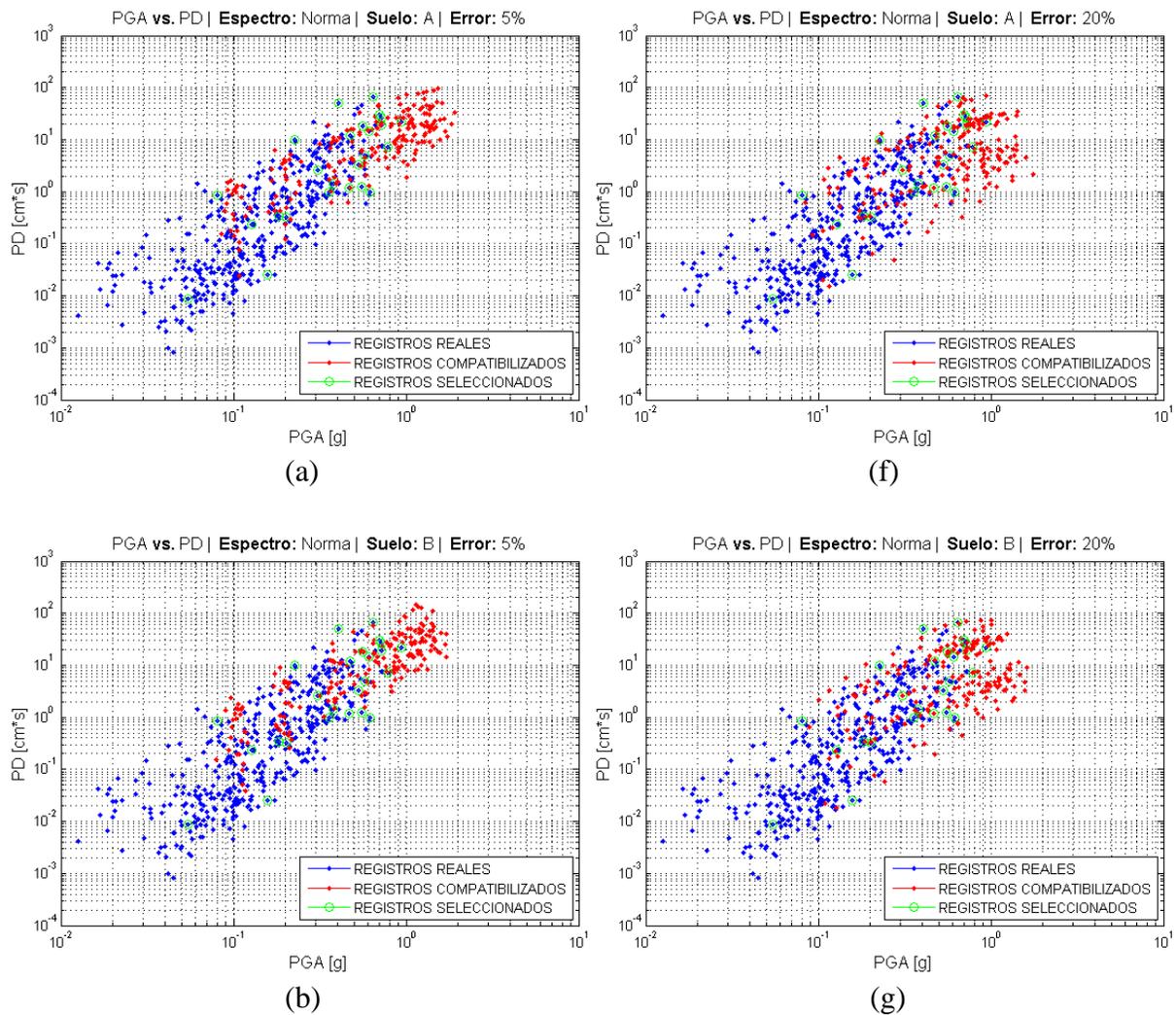


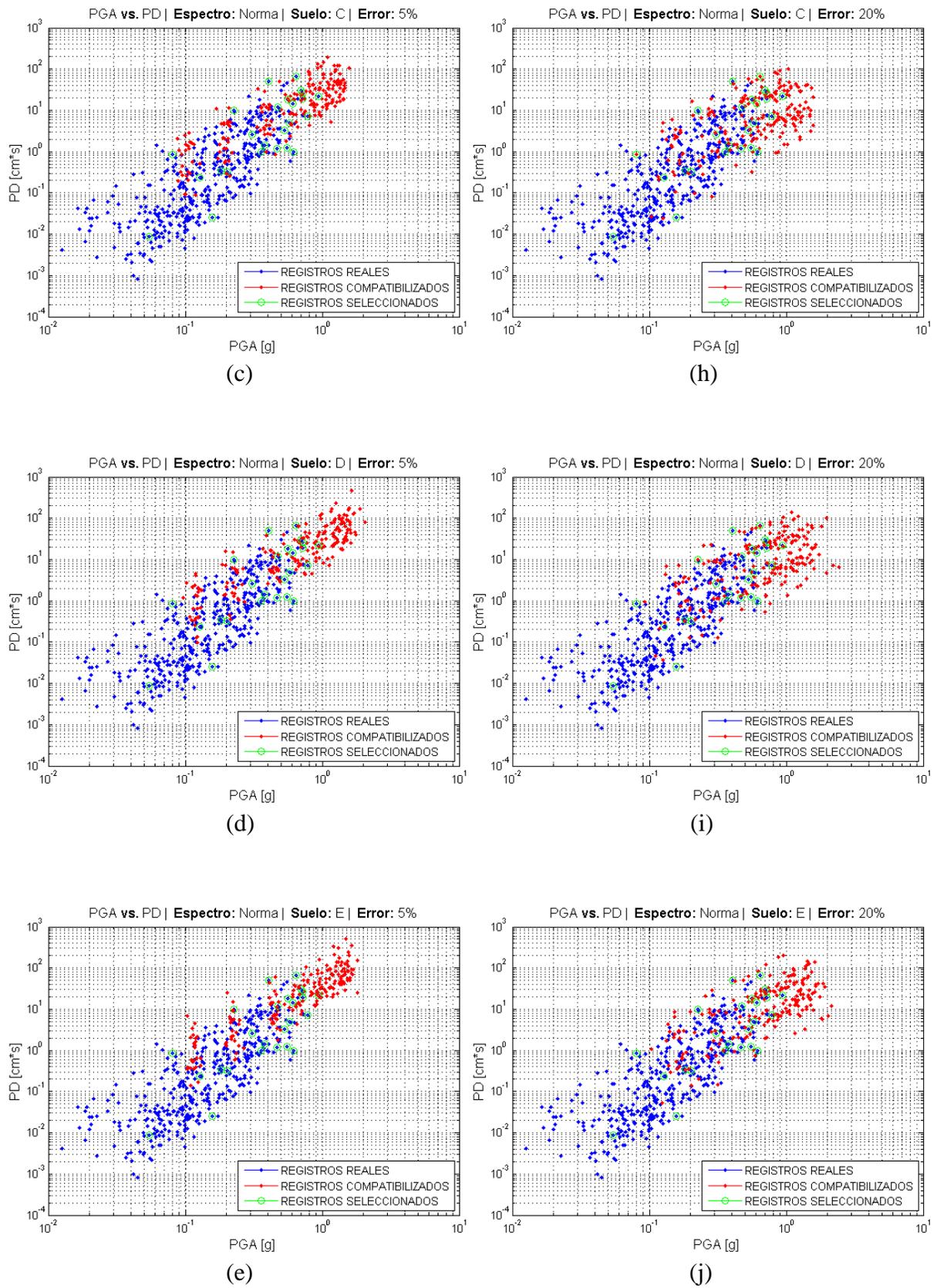
**Figura 5.4:** Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma para Suelo tipo A y E.

Al observar la figura 5.4, es posible saber con mayor certeza la diferencia que existe al compatibilizar los registros a un espectro de un tipo de suelo A y un tipo de suelo E, es decir se puede ver la comparación entre un suelo de mejor comportamiento sísmico y un suelo que exige mayor demanda sísmica respectivamente, lo cual se puede apreciar en dicha figura donde los registros compatibilizados de color verde (Suelo tipo E), tienen mayores potenciales destructivos que los registros compatibilizados de color rojo (Suelo tipo A). Por lo tanto, se reafirma la

clasificación sísmica del terreno utilizado por la Norma NCh433, la cual se basa a través de la experiencia empírica y la teoría, indicando que el mejor comportamiento sísmico se observa en terrenos de afloramiento rocoso, mientras que el mayor daño se observa en terrenos de suelos finos blandos.

En la Figura 5.5 se muestran los registros compatibilizados al espectro de la Norma utilizando un 5% y 20% de error con respecto al Target, diferenciándolos para cada tipo de suelo. En este caso, también se pueden observar las diferencias de los potenciales destructivos de los registros compatibilizados para cada tipo de suelo, en donde se aprecia como los valores aumentan, pasando por todos los tipos de suelos, desde el suelo tipo A hasta el suelo tipo E. También es posible observar cómo es la variación al utilizar distintos márgenes de error para cada tipo de suelo, sin embargo, para el caso de un 20% de error no es tan notorio el aumento del Potencial Destructivo para cada tipo de suelo (comparado con el caso para un 5% de error, en el cual se ve un mayor aumento del parámetro sísmico), observándose una distribución similar a la tendencia de los registros originales (color azul).





**Figura 5.5:** Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma para cada tipo de Suelo.

A partir de los resultados anteriores, es posible seleccionar registros específicos de los ya seleccionados en la Tabla 4.5, y así observar de mejor manera como es el proceso de compatibilización para registros puntuales y ver la tendencia que siguen. En la Tabla 5.1 se muestran 5 registros específicos seleccionados desde la Tabla 4.5, con sus parámetros sísmicos. Dichos registros se seleccionan de manera de obtener distintos rangos de PGA y Potencial Destructivo para abarcar la tendencia de todos los registros seleccionados.

Tabla 5.1: Registros seleccionados de catálogo de terremotos Jorquera (2014).

Registro	Registro Base	Canal	Evento	Estación	PGA [g]	PD [cm*s]
1	1	1	604091	ALTO HOSPICIO	0.0545	0.0089
3	9	1	TOCOPILLA 2007	ANTOFAGASTA UCN	0.1280	0.2289
5	27	1	MAULE 2010	CONCEPCIÓN	0.4083	51.0885
17	84	2	809101	PICA	0.6169	0.9637
23	12	3	0510171	ARICA	0.1574	0.0259

En la Figura 5.6 se muestran los registros de la Tabla 5.1, para poder observar gráficamente sus parámetros sísmicos, es decir, el Potencial Destructivo en función del PGA de los registros, los cuales se simbolizan con círculos de diferentes colores.

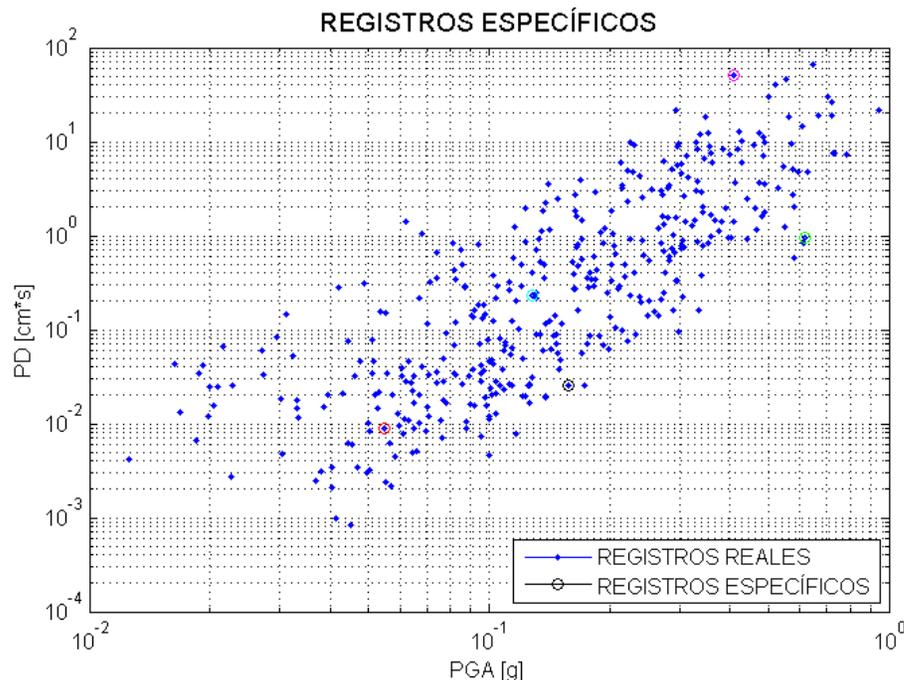
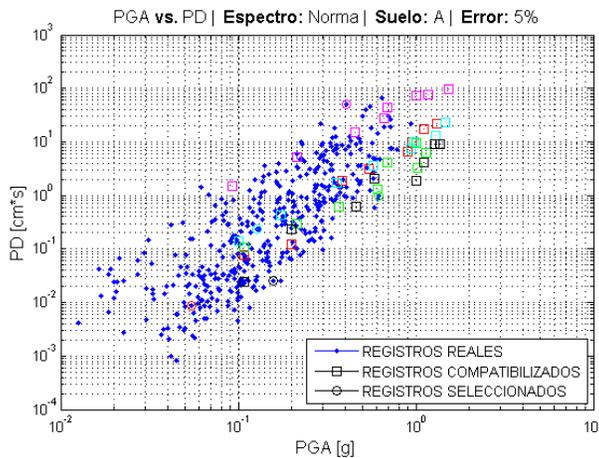


Figura 5.6: Potencial Destructivo en función de PGA de Registros seleccionados específicos.

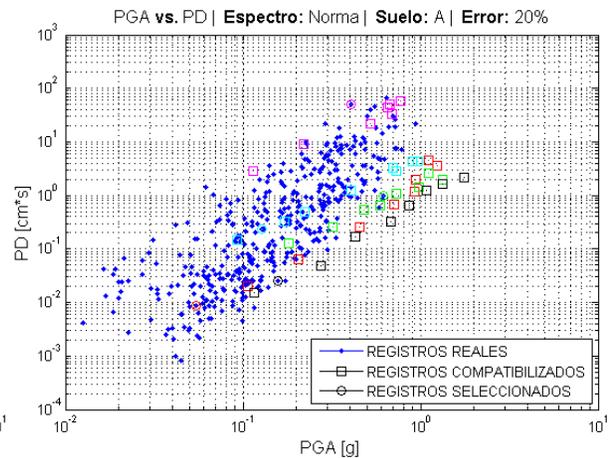
Finalmente, en la Figura 5.7 se muestran los registros específicos de la Tabla 5.1, compatibilizados al espectro de la Norma, utilizando un 5% y 20% de error con respecto al Target, diferenciándolos para cada tipo de suelo. En dicha figura, se puede apreciar la tendencia de los registros compatibilizados a partir de los registros específicos, para los diferentes tipos de suelos, donde por ejemplo, para el registro de la Estación de Concepción (círculo de color rosado), se puede ver desde la Tabla 5.1 que el registro original tiene un potencial destructivo alto

al igual que la tendencia de sus registros compatibilizados, mientras que para el registro de la Estación Alto Hospicio (círculo de color rojo), se observa que su potencial destructivo es bajo, así como también la tendencia de sus registros compatibilizados. Por lo tanto, se desprende de la Figura 5.7, que la tendencia del potencial destructivo de los registros compatibilizados para diferentes niveles de PGA, depende de la destructividad del registro inicial y del Target que se utiliza para realizar la compatibilización.

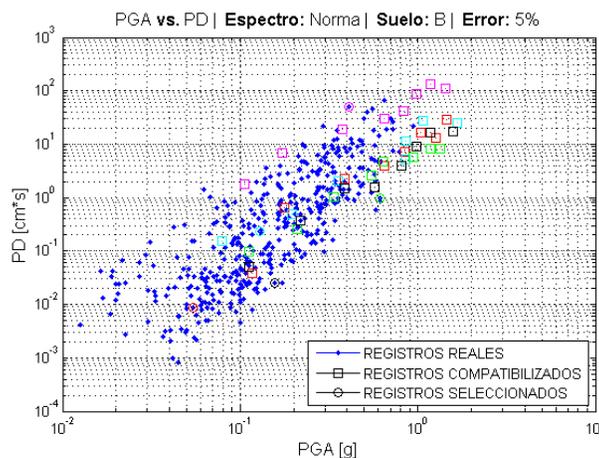
Al igual que en los resultados anteriores, se desprende de los gráficos, que el potencial destructivo de los registros compatibilizados, va aumentando desde el suelo A hasta el suelo E, y también se puede observar que los registros compatibilizados para los distintos niveles de PGA de cada registro original, siguen una tendencia aproximadamente lineal, sin embargo, dicha tendencia se puede ver alterada por el error asociado a la compatibilización, como también las frecuencias del target utilizadas, ya que al utilizar un target con escasos puntos, también puede influir en que la compatibilización no se realice de la forma más adecuada, por lo tanto, pueden ser varios factores los cuales interfieren para que la tendencia no sea completamente lineal.



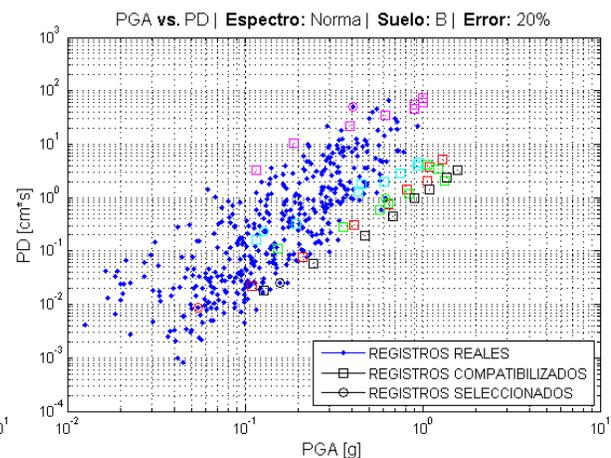
(a)



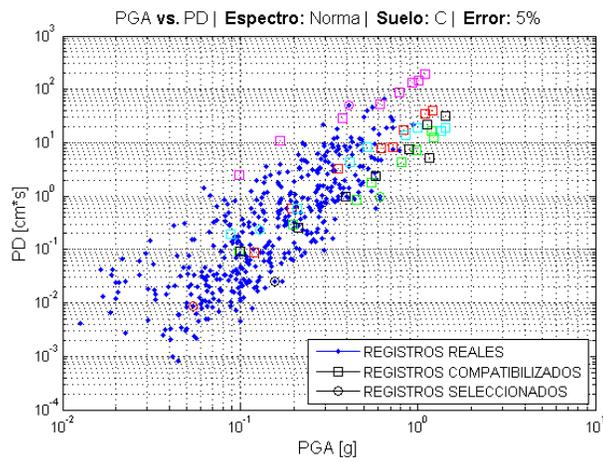
(f)



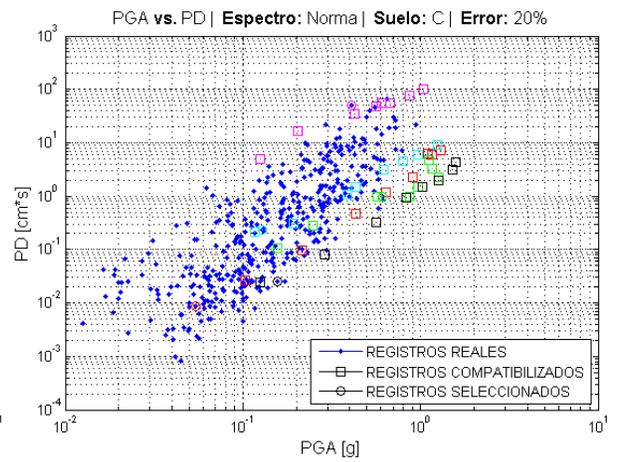
(b)



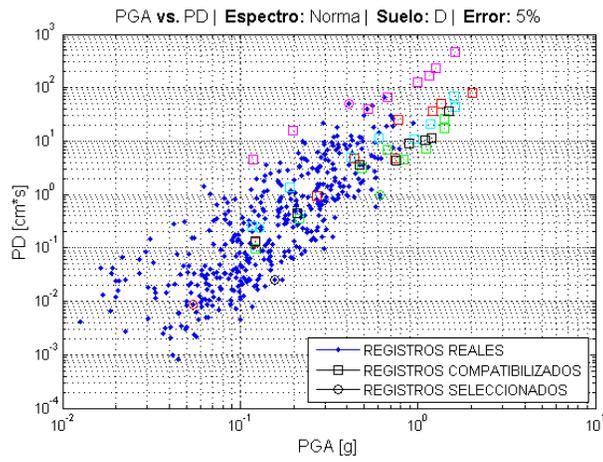
(g)



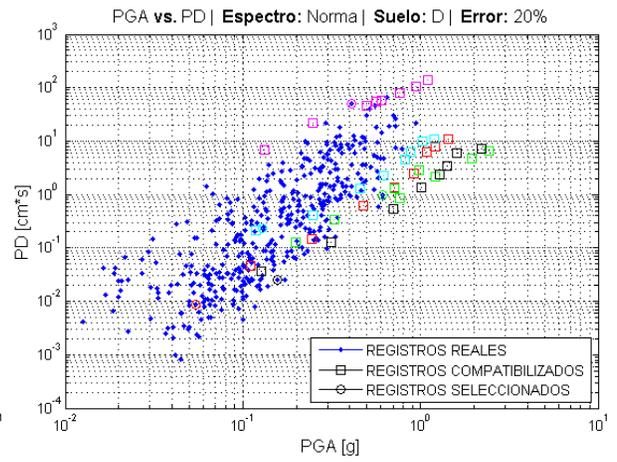
(c)



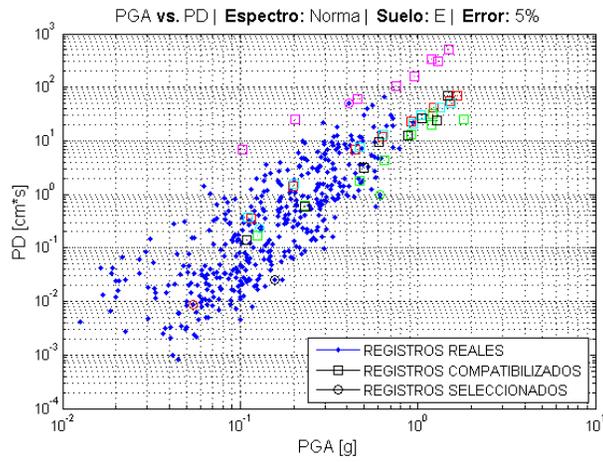
(h)



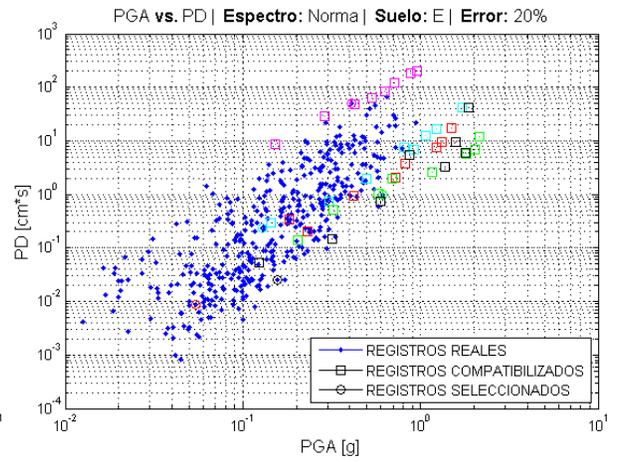
(d)



(i)



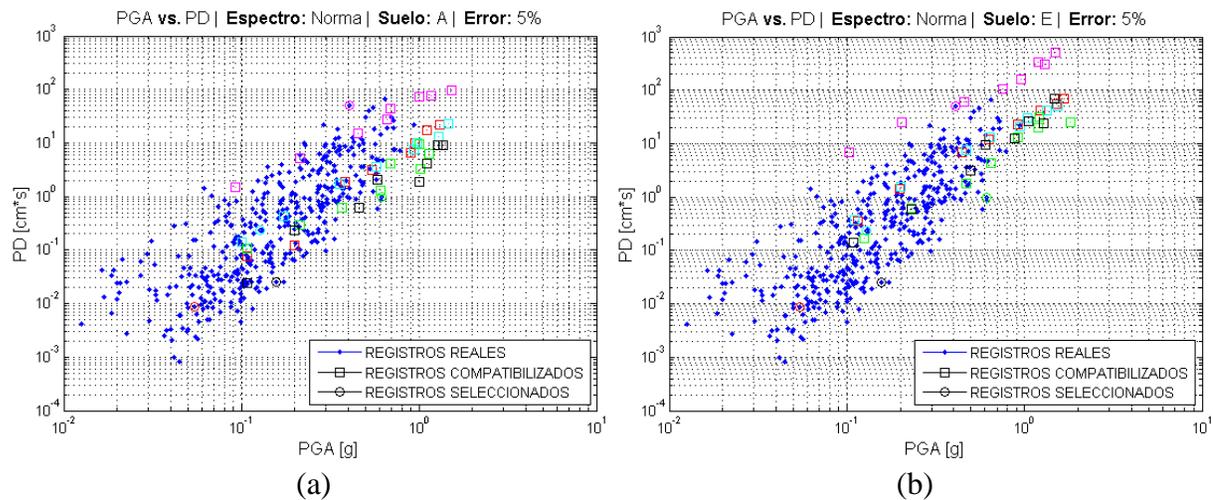
(e)



(j)

Figura 5.7: Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma para registros específicos.

En la Figura 5.8 se muestran los registros específicos de la Tabla 5.1, compatibilizados al espectro de la Norma, utilizando un 5% de error con respecto al Target, considerando los tipos de suelos A y E, de manera de poder realizar una mejor comparación del potencial destructivo de los registros compatibilizados para dichos suelos. Se observa de la Figura 5.8 que los registros compatibilizados al espectro de la Norma para un suelo tipo A tienen un menor potencial destructivo en comparación con los registros compatibilizados al espectro de la Norma para un suelo tipo E.



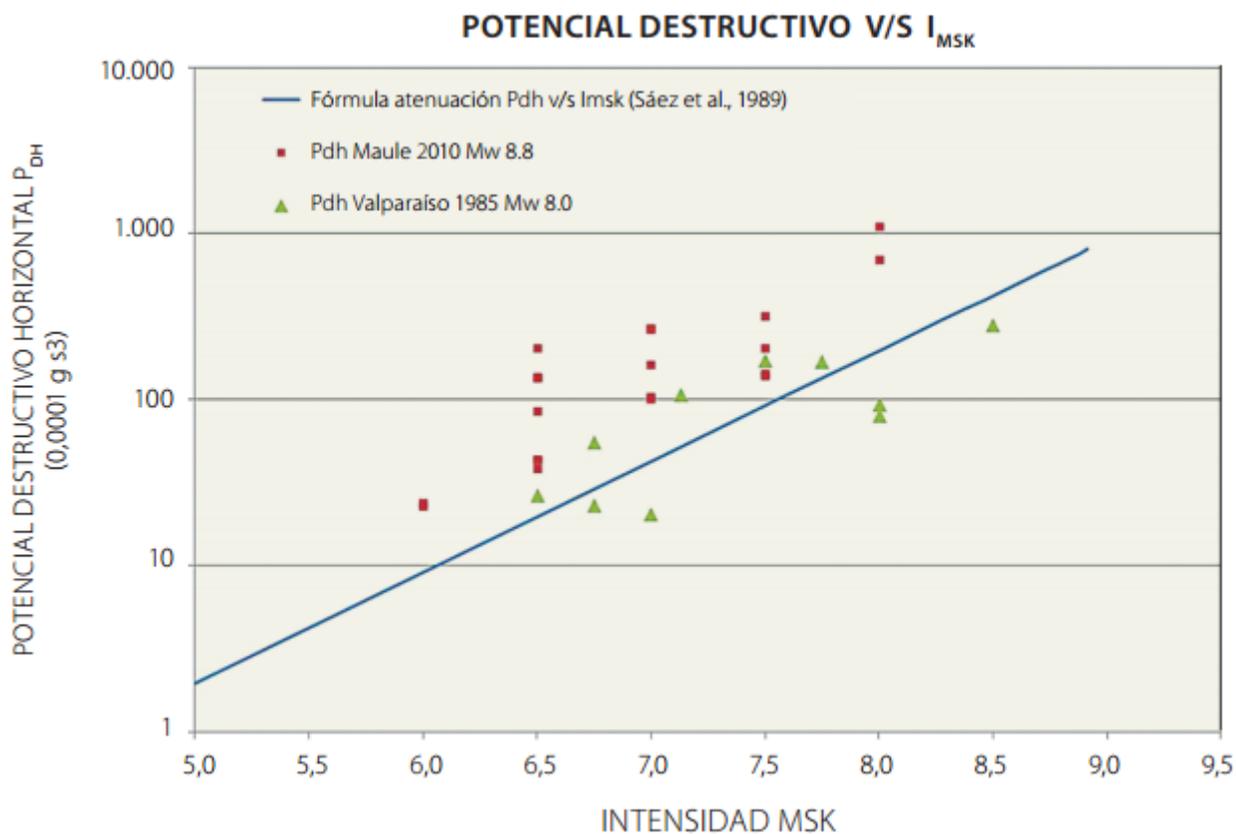
**Figura 5.8:** Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma para Suelos A y E.

Otra comparación relevante que es posible realizar a partir de la Figura anterior, es la relación efectuada por Saragoni y otros (1989), a partir de la función de correlación entre la intensidad instrumental Potencial Destructivo ( $PD$ ) con la Intensidad de Mercalli Modificada ( $IMM$ ), para los datos del terremoto de Chile Central en el año 1985. La función de correlación se define como:

$$IMM = 4.86 + 1.35 \cdot \log_{10}(PD) \quad (5.1)$$

Considerando la ecuación anterior es posible calcular la Intensidad de Mercalli a partir de los resultados obtenidos en la Figura 5.8 (a) y (b). Teniendo en cuenta el registro desde la estación Concepción compatibilizado al espectro de la Norma para los suelos tipo A y E (Registro 5 en Tabla 5.1), para un Nivel de PGA aproximado de 1g, se observan valores de potencial destructivo de 72.48 [cm\*s] y 162.61 [cm\*s], obteniéndose valores de  $IMM$  igual a 8.73 y 9.21, respectivamente. Para los resultados anteriores se observa una pequeña variación entre la Intensidad de Mercalli Modificada de los registros compatibilizados al espectro de la Norma para los Suelo A y E, lo cual se puede explicar debido a que la curva propuesta por Saragoni y otros (1989), corresponde a una relación empírica para datos acelerográficos sólo del terremoto de Chile de 1985. En la Figura 5.9 se muestra la función de correlación definida en la ecuación (5.1), así como también se muestra la correlación entre el Potencial Destructivo Horizontal  $Pdh$  e Intensidad MSK para los datos acelerográficos del terremoto El Maule en el año

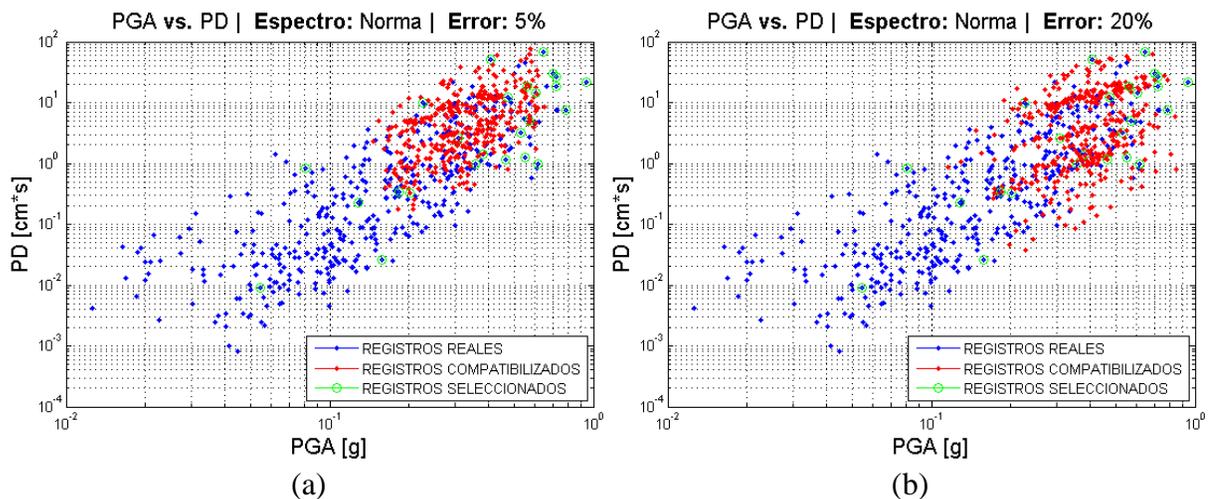
2010 en Chile, y del terremoto de Valparaíso en el año 1985. En dicha figura se observa que los valores de Potencial Destructivo para el terremoto de El Maule 2010 son mayores a los pronosticados por la ecuación (5.1) para el mismo nivel de daño IMM, por lo tanto para un estudio más exhaustivo, se necesita una curva de correlación realizada con datos acelerográficos que contengan también terremotos actuales.



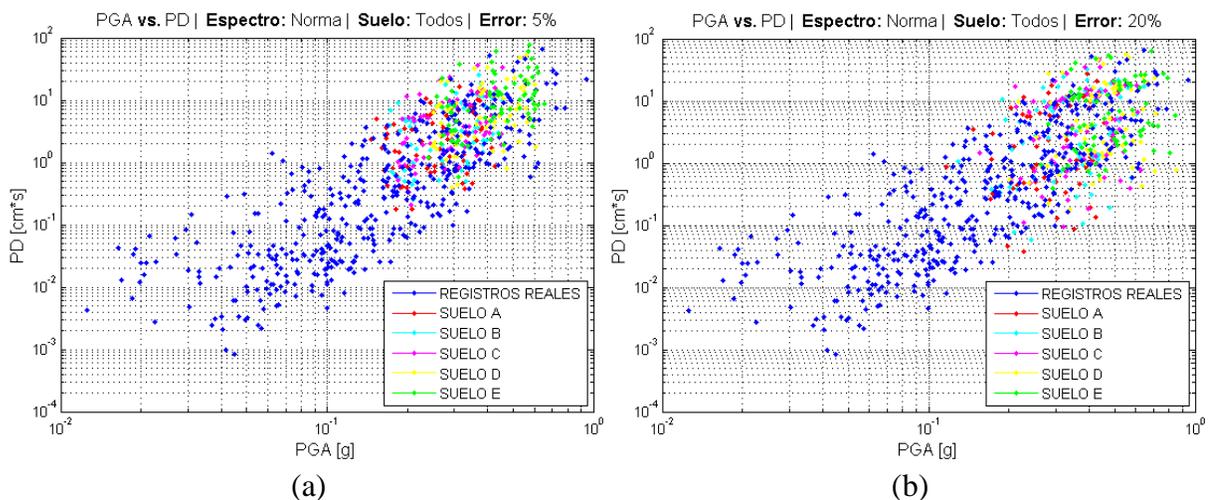
**Figura 5.9:** Correlación entre Potencial Destructivo Horizontal Pdh e Intensidad MSK para los datos acelerográficos del terremoto El Maule, Chile 2010, y del terremoto de Valparaíso, Chile 1985. Los datos se comparan con la ecuación propuesta por Saragoni y otros (1989) (Ruiz y Saragoni, 2012).

## 5.2. ESPECTRO DE NORMA, Ao SELECCIONADOS

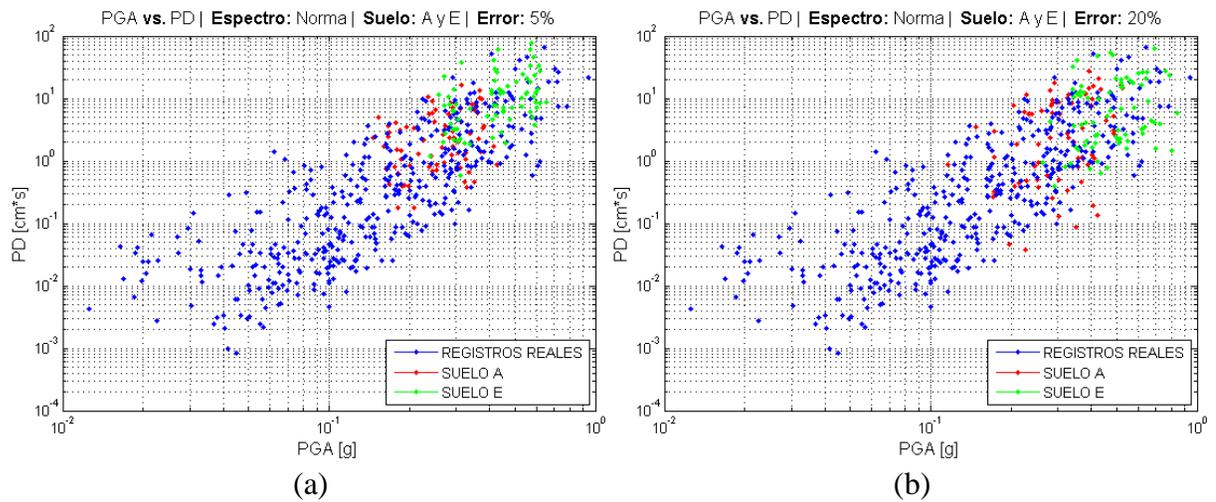
En este punto, se presentan los resultados obtenidos al graficar el Potencial Destructivo en función del PGA de todos los registros de dirección horizontal a partir del catálogo de terremotos de Jorquera (2014), así como también los registros compatibilizados al espectro de la Norma chilena NCh433 para los niveles de PGA de la base de datos de registros compatibilizados denominados “AoSeleccionados”, es decir, para valores de aceleración efectiva máxima de la Norma NCh433 (0.2g, 0.3g y 0.4g). Cabe destacar que los gráficos están en escala logarítmica.



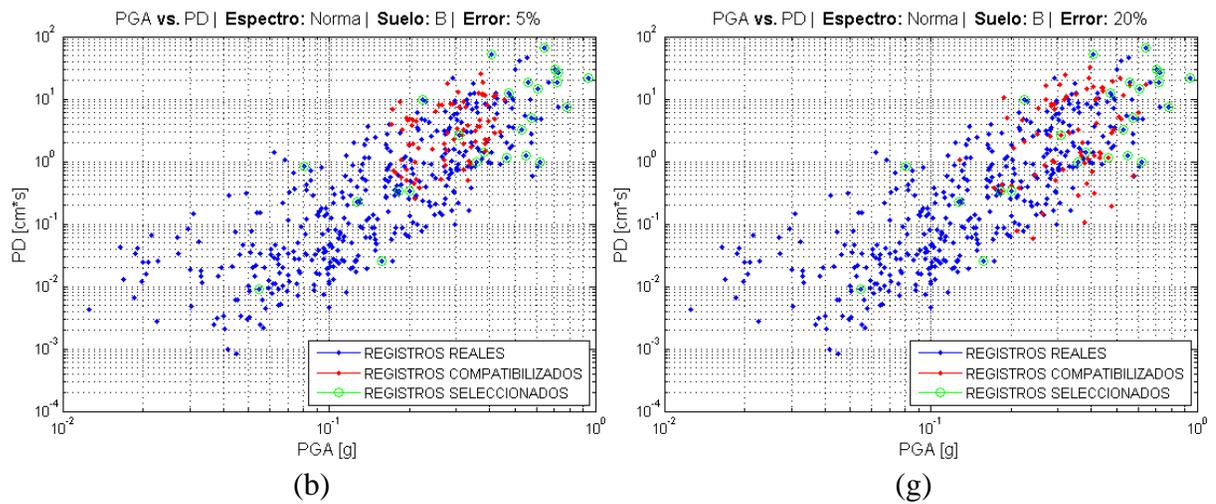
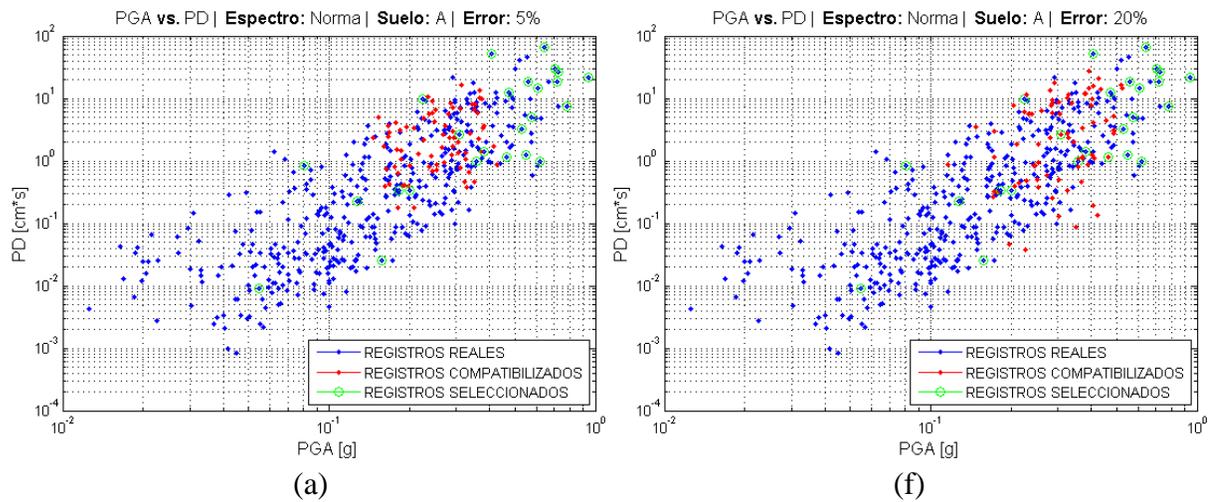
**Figura 5.10:** Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma para todos los tipos de Suelos de la Norma NCh433, utilizando sus niveles de aceleración efectiva máxima. (a) Registros compatibilizados para un 5% de error con respecto al Target. (b) Registros compatibilizados para un 20% de error con respecto al Target.

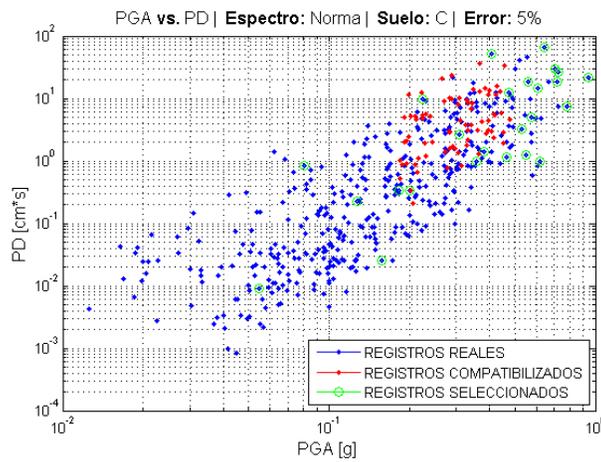


**Figura 5.11:** Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma para todos los tipos de suelos de la Norma NCh433, utilizando sus niveles de aceleración efectiva máxima.

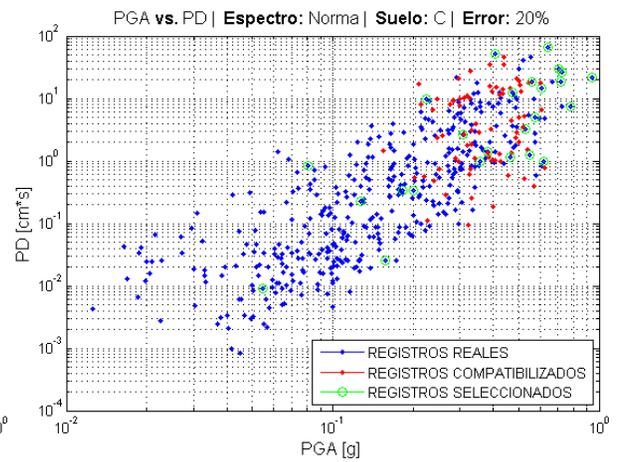


**Figura 5.12:** Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma para Suelo tipo A y E, utilizando sus niveles de aceleración efectiva máxima.

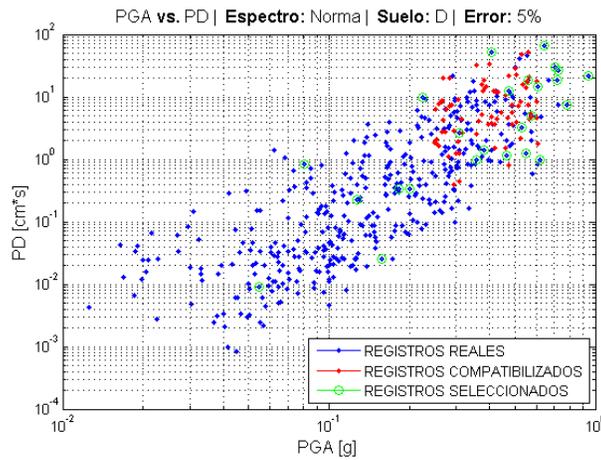




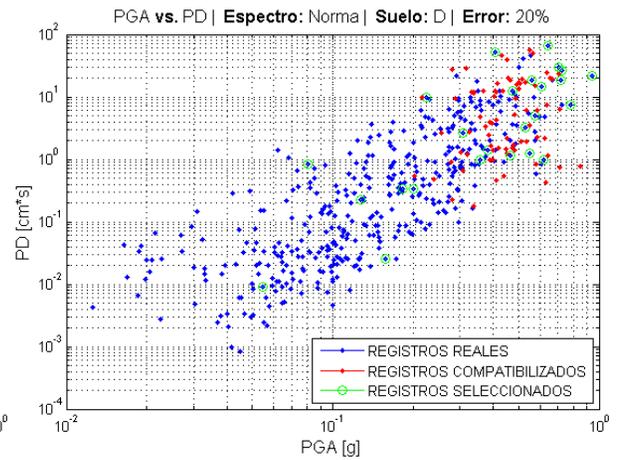
(c)



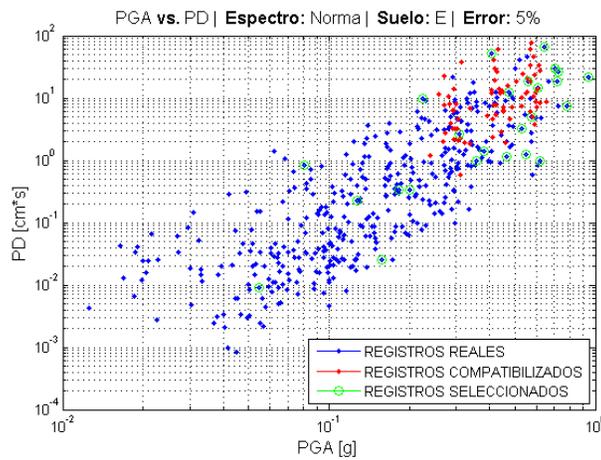
(h)



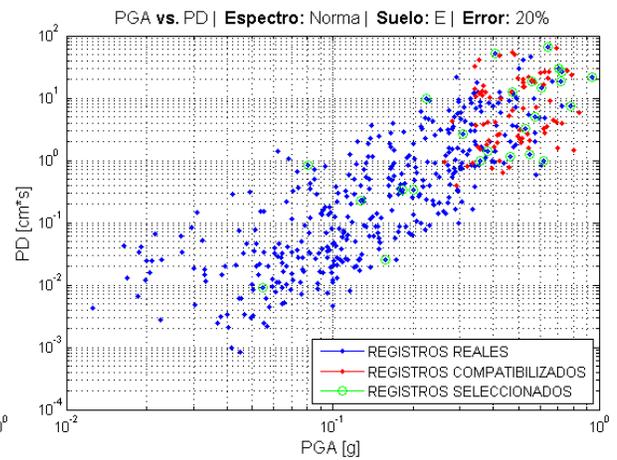
(d)



(i)

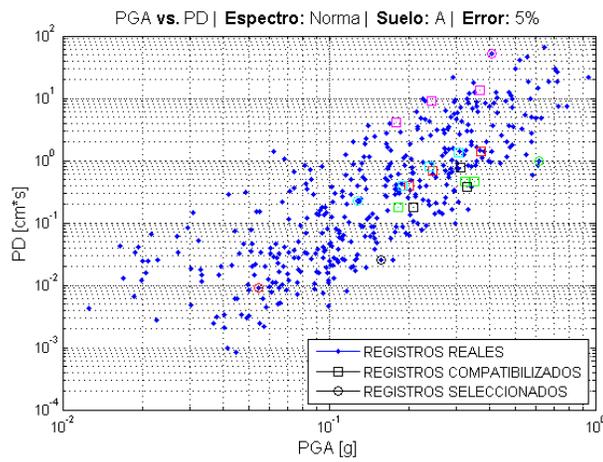


(e)

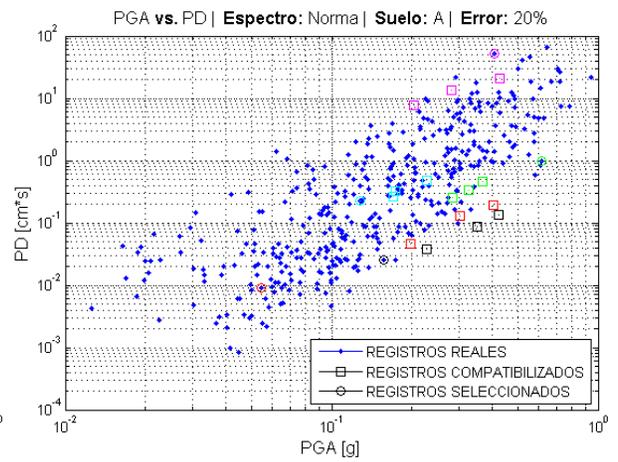


(j)

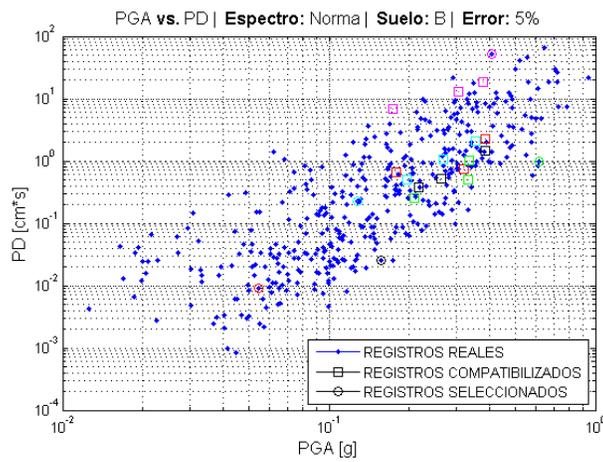
**Figura 5.13:** Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma para cada tipo de Suelo, utilizando sus niveles de aceleración efectiva máxima.



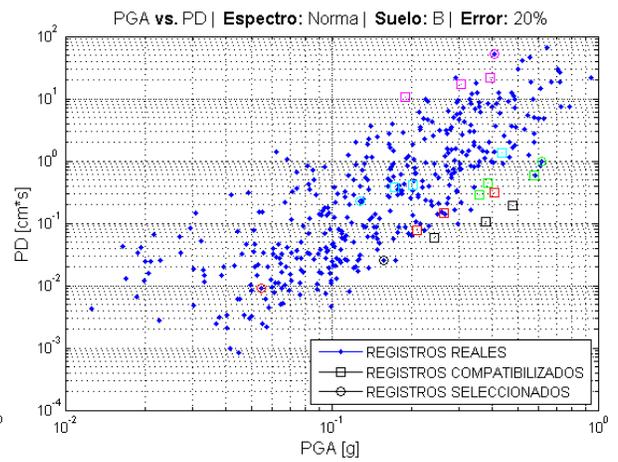
(a)



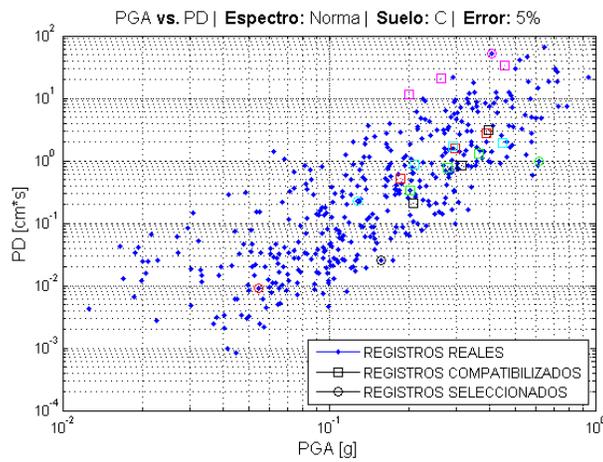
(f)



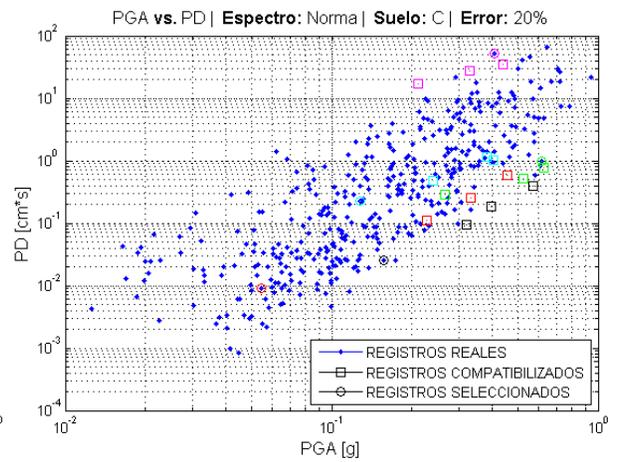
(b)



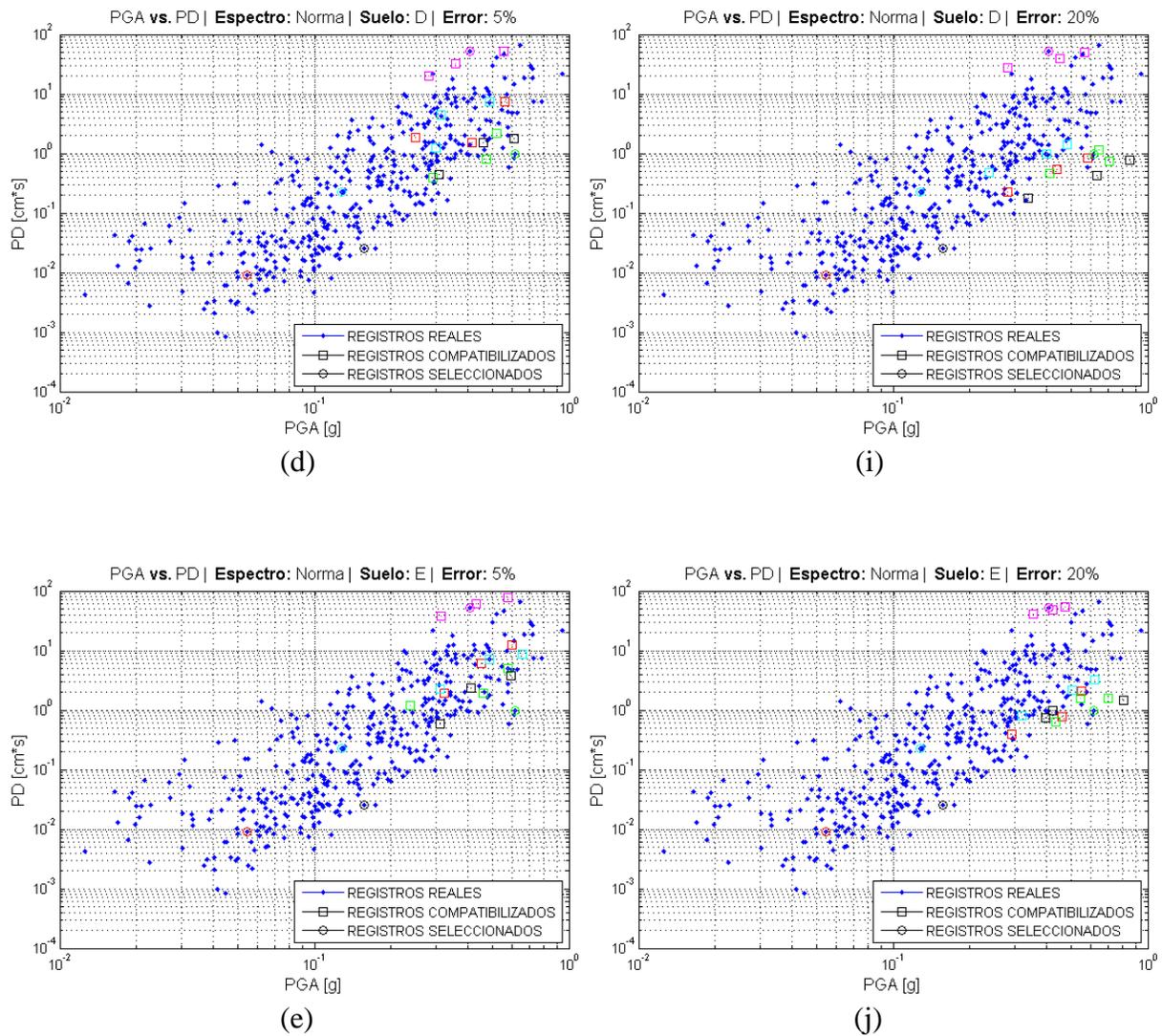
(g)



(c)



(h)

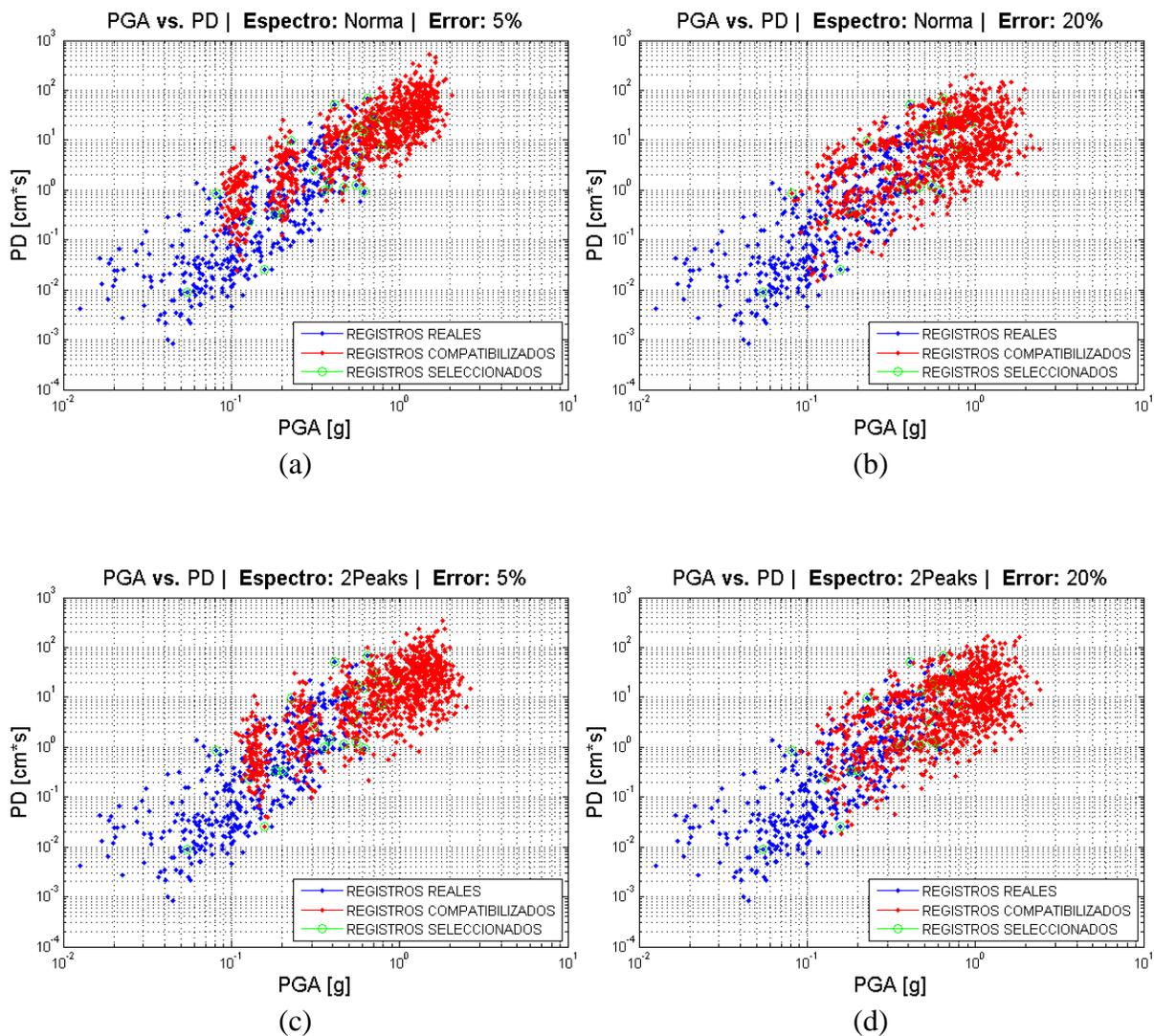


**Figura 5.14:** Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma para registros específicos, utilizando sus niveles de aceleración efectiva máxima.

Al igual que en el punto anterior, para las figuras anteriores se tiene un análisis similar (desde la Figura 5.10 a la 5.14), sin embargo, los niveles de PGA utilizados se limitan a solo 3, por lo tanto, los registros compatibilizados son menores en comparación con el punto anterior. Otra característica de estas figuras, se puede apreciar en la Figura 5.12, en la cual se puede ver que al comparar los registros compatibilizados para los tipos de suelo A y E, los niveles de PGA no concuerdan, es decir, los registros compatibilizados para el suelo A tienen menores valores de potencial destructivo en función del PGA, mientras que para los registros del suelo tipo E, se observan mayores valores para estos parámetros. Esto se puede explicar por el factor “S” del espectro de aceleración de la Norma NCh433 (ver ecuación (2.35)), el cual amplifica o simplifica la aceleración efectiva máxima para cada tipo de suelo.

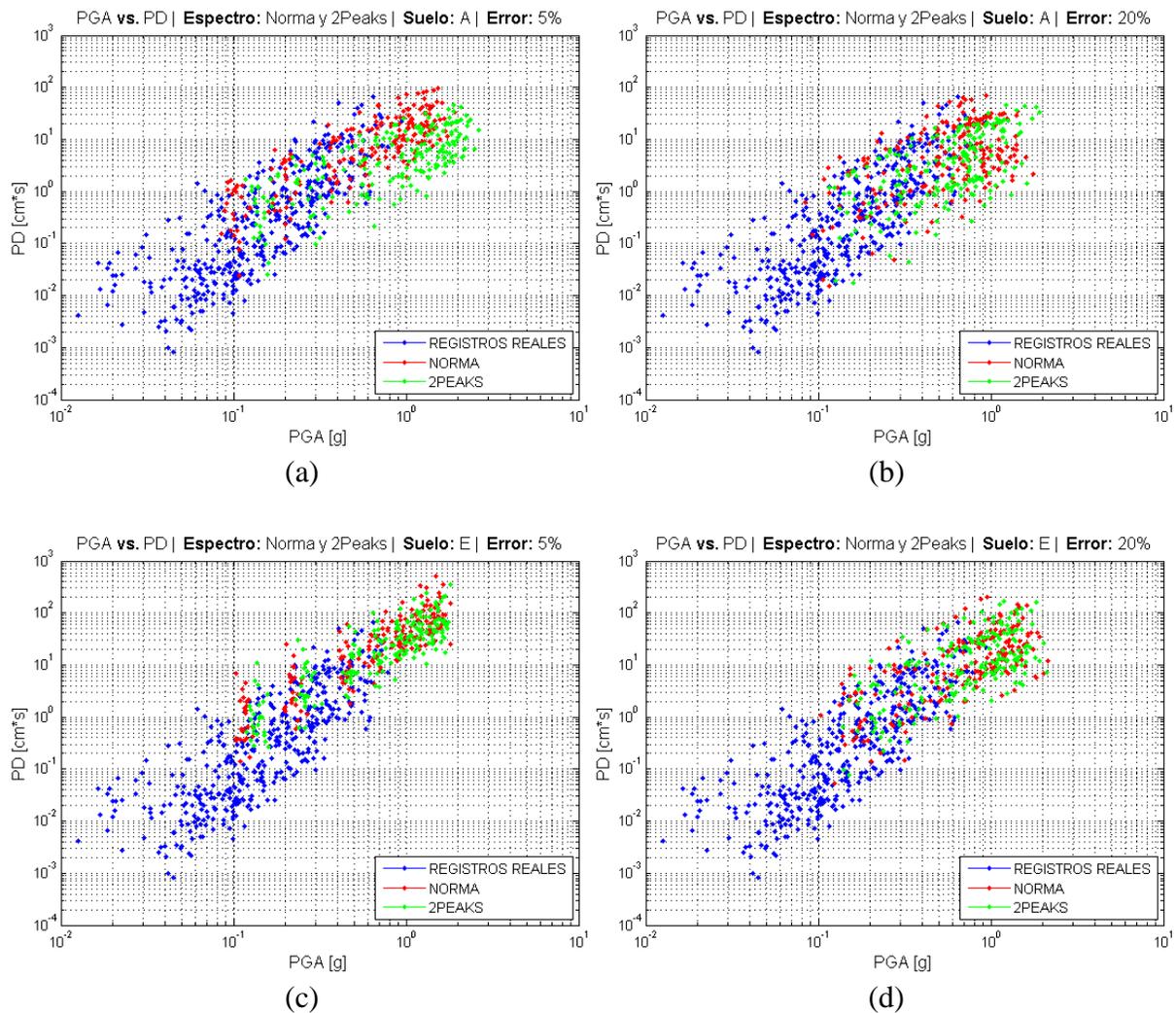
### 5.3. ESPECTRO DE NORMA Y DOS PEAKS

Luego de analizar los resultados para los registros compatibilizados al espectro de la Norma Chilena NCh433, se presenta en la Figura 5.15 una comparación de los resultados obtenidos al graficar el Potencial Destructivo en función del PGA de todos los registros de dirección horizontal a partir del catálogo de terremotos de Jorquera (2014), así como también los registros compatibilizados al espectro de la Norma Chilena NCh433, y al espectro con dos Peaks, para todos los tipos de suelos de la norma y para los niveles de PGA de la base de datos de registros compatibilizados denominados “PGASeleccionados”, es decir, para valores de PGA que abarcan un rango entre 0.1g y 1.4g.



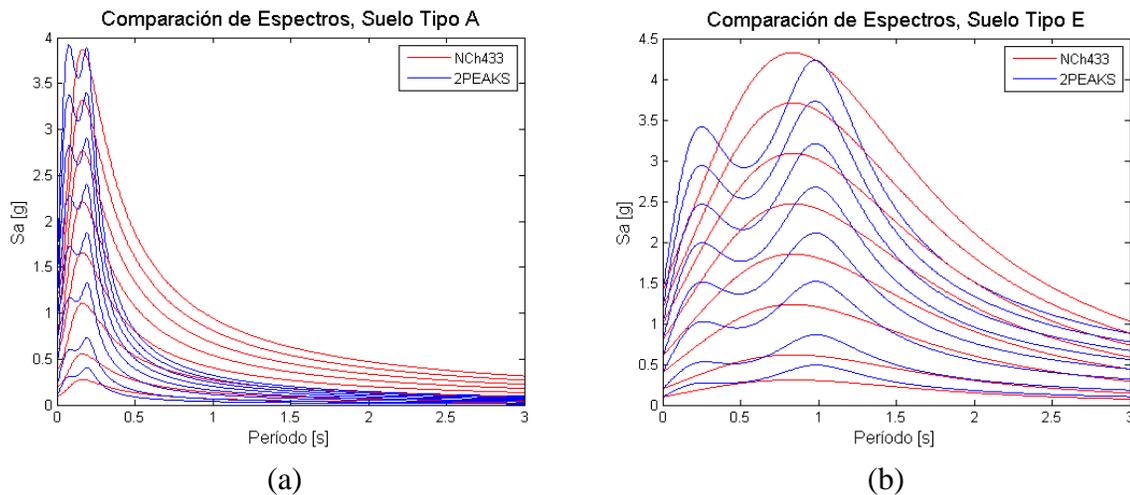
**Figura 5.15:** Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma y al espectro con dos Peaks, para todos los tipos de Suelos de la Norma NCh433.

Como se puede apreciar desde la figura anterior, el potencial destructivo para los registros compatibilizados al espectro con dos Peaks, es menor en comparación con el caso para el espectro de la norma chilena, lo cual es posible de observar para los registros compatibilizados utilizando un margen de error de un 5% con respecto al Target (gráficos (a) y (c)). De la misma forma, se puede visualizar de mejor manera dicha diferencia de potencial destructivo, a partir de la Figura 5.16, la cual muestra la comparación de los resultados obtenidos al graficar el Potencial Destructivo en función del PGA de los registros compatibilizados al espectro de la Norma Chilena NCh433, y al espectro con dos Peaks, utilizando niveles de PGA que abarcan un rango entre 0.1g y 1.4g, para el mismo tipo de suelo, con un error de 5% y 20%. Se observa de la Figura 5.16, que el potencial destructivo para el suelo A y E con un 5% de error, es mayor para los registros compatibilizados al espectro de la norma chilena, sin embargo, para el caso del suelo E, la diferencia no es tan evidente. Los resultados con un error de 20% siguen la tendencia de los registros reales y no se aprecia una clara distinción para ambos espectros.



**Figura 5.16:** Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma y al espectro con dos Peaks para Suelos tipo A y E de la Norma NCh433, para un 5% y 20% de error.

La condición anterior se puede explicar debido al tipo de espectro que se utiliza como Target al realizar el proceso de compatibilización espectral, lo cual se aprecia de mejor manera en la Figura 5.17, donde se muestran los espectros generados como Target para el suelo tipo A y E, y además se puede observar la diferencia que existe entre los espectros, notándose que el espectro con dos peaks tiene un tamaño inferior al de la Norma Chilena en la mayoría de sus períodos, sin embargo, un mayor desajuste espectral se ve para el caso del suelo tipo A para períodos superiores a 0.3 segundos aproximadamente, lo cual incide directamente en las propiedades de los registros compatibilizados, obteniéndose mayores valores de Potencial Destructivo para los registros compatibilizados al espectro de la Norma Chilena, como se puede observar en la Figura 5.16 (a).



**Figura 5.17:** Espectros generados para suelo tipo A y E.

Para validar la incidencia del tipo de Target al realizar la compatibilización, a partir de la Figura 5.17 (a) es posible simplificar un espectro (por ejemplo el de la norma), con la finalidad de que a partir de un período tengan los mismos valores espectrales, de manera de poder efectuar una comparación del potencial destructivo de los registros compatibilizados a espectros similares en la mayoría de sus períodos, lo cual se puede visualizar en la Figura 5.18, donde se muestran los espectros generados a partir de la Figura 5.17 (a), sin embargo a partir de un período se iguala el espectro de la norma chilena (0.27 segundos aproximadamente), al espectro con dos Peaks. En la Figura 5.18 (a) se muestran los espectros generados hasta un período de 3 segundos, mientras que en la Figura 5.18 (b) es posible observar los espectros generados hasta un período de 1 segundo, de manera de poder observar mejor la diferencia entre el espectro de la Norma y el de dos Peaks.

En la Figura 5.19 se muestra la comparación de los resultados obtenidos al graficar el Potencial Destructivo en función del PGA de los registros compatibilizados a los espectros generados en las Figuras 5.17 (a) y 5.18 (a), utilizando niveles de PGA que abarcan un rango entre 0.1g y 1.4g, para el suelo tipo A, considerando un error de 5%.

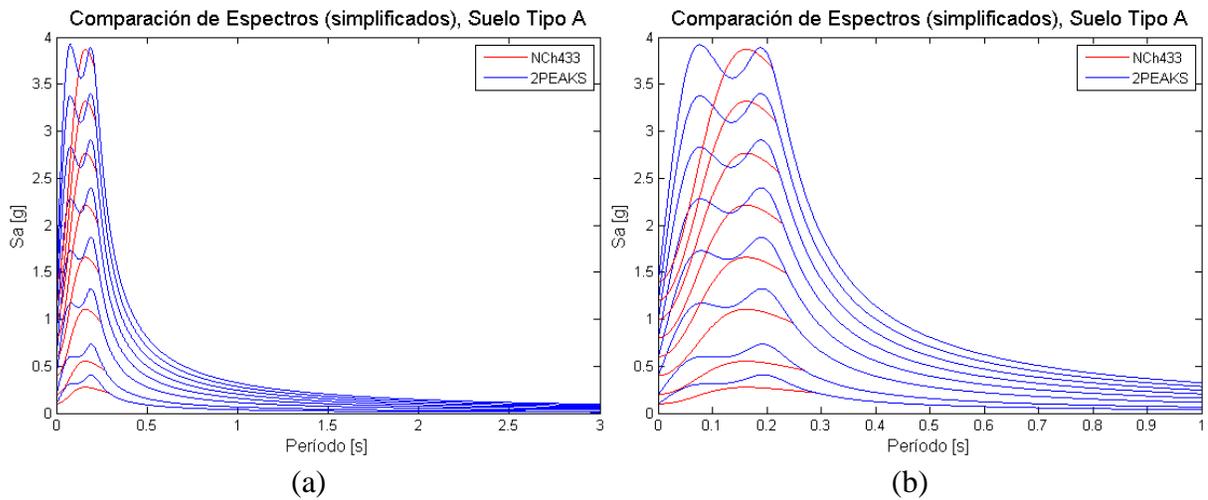


Figura 5.18: Espectros generados para suelo tipo A con espectros igualados a partir de un período.

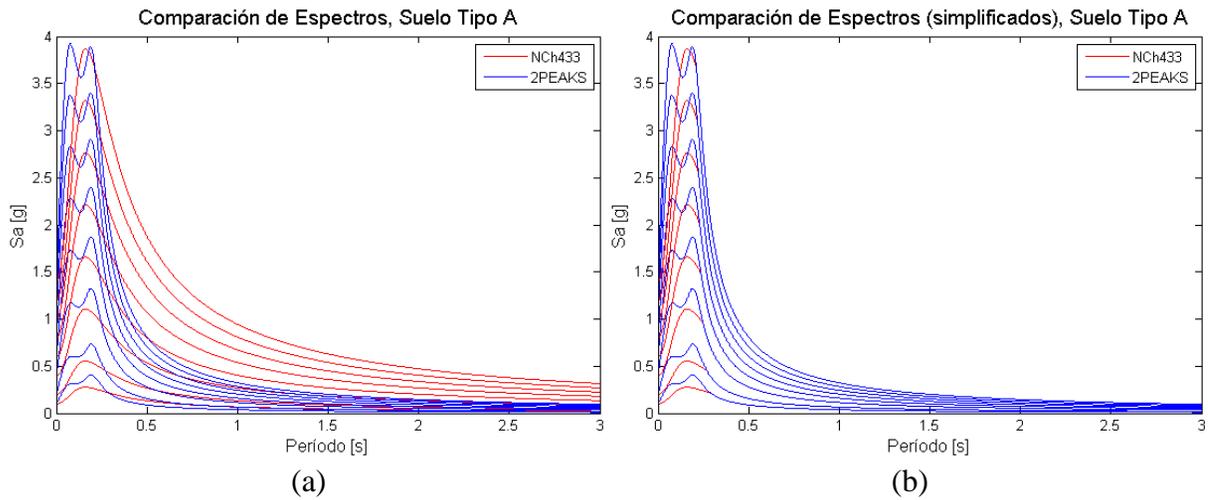


Figura 5.19: Espectros generados para suelo tipo A con espectros igualados a partir de un período y gráficos de potencial destructivo en función del PGA de los registros compatibilizados a sus Targets respectivos.

Al comparar los resultados entre las Figura 5.19 (c) y (d), es posible observar que al realizar la compatibilización espectral utilizando espectros similares en la mayoría de sus períodos (ver Figura 5.19 (b)), la tendencia del potencial destructivo en función del PGA de los registros compatibilizados es similar, mientras que para espectros con formas semejantes, pero con valores sustancialmente diferentes en la mayoría de sus períodos (ver Figura 5.19 (a)), los resultados varían de acuerdo al desajuste espectral de los Targets utilizados, observándose una tendencia mayor del potencial destructivo en función del PGA de los registros compatibilizados al espectro con mayor envergadura. Por lo tanto, son relevantes las características del espectro que se utiliza como Target, debido a que inciden directamente en las propiedades del registro compatibilizado, y por ende, en su destructividad.

Finalmente, otro punto importante que se debe tener en consideración a partir de los resultados obtenidos, es la capacidad del método de compatibilización para ajustar el PGA del registro compatibilizado al PGA del Target. Como se puede apreciar en las distintas figuras de este capítulo, el PGA de los registros compatibilizados es similar a los valores de PGA de los espectros utilizados como Target, sin embargo, los valores no son iguales. Esta característica ya se ha mencionado en el capítulo 3 de este trabajo, sin embargo, al observar los resultados anteriores, se puede ver que en la mayoría de los casos el PGA es difícil de ajustar, y de mayor complejidad es, si es que se utiliza un rango de frecuencias bajo al realizar el proceso de compatibilización, por lo tanto, se deben tener varios factores al momento de realizar la compatibilización. A partir de la Figura 5.19 (c) y (d) es posible observar que el PGA de los registros compatibilizados al espectro de la norma, es más cercano al PGA del Target respectivo (niveles de PGA de la base de datos de registros compatibilizados denominados "PGASeleccionados"), sin embargo, para el caso del PGA de los registros compatibilizados al espectro con dos peaks, se puede visualizar una mayor diferencia con respecto al PGA del Target, debido a que el espectro con dos Peaks tiene una alta pendiente para períodos bajos, mientras que el espectro de la Norma tiene una pendiente menor para dichos períodos, por ende, se debe tener en consideración la pendiente del Target para frecuencias altas cuando se realiza el proceso de compatibilización.

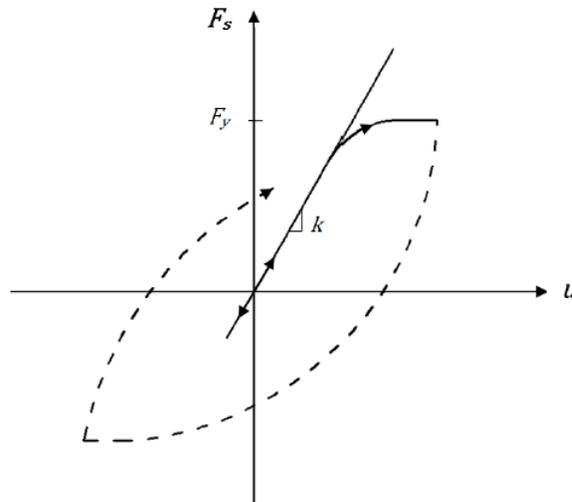
Los gráficos para el caso del Potencial Destructivo de los registros compatibilizados al espectro con dos peaks, utilizando los diferentes tipos de suelos de la norma chilena, se presentan en anexos y tienen el mismo análisis que en este capítulo (ANEXO D).

# CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL

Al ocurrir un evento sísmico de gran intensidad, las solicitaciones que se generan en las estructuras con comportamiento elástico son muy elevadas, por lo tanto, generalmente no resulta económicamente factible diseñar los edificios de modo que no sufran ningún daño ante eventos de sismos severos y de baja probabilidad de ocurrencia. En diseño sísmico es común diseñar la estructura para que tenga una resistencia menor, considerando una fuerza lateral de fluencia  $F_y$  que sea menor que la demanda de fuerza elástica  $F_e$ , lo que permite que el sistema cuente con las propiedades de ductilidad suficientes para poder deformarse en forma plástica, más allá del rango elástico lineal, y así disipar la energía que introduce el sismo mediante ciclos de histéresis.

## 6.1. ANÁLISIS NO LINEAL

En la Figura 6.1 es posible ver una típica curva de Fuerza versus Deformación de un sistema de un grado de libertad sometido a un ciclo. Como se puede visualizar en dicha Figura, al exceder el desplazamiento que corresponde a la fuerza de fluencia, es decir, el desplazamiento de fluencia, la rigidez  $k$  (la cual es la pendiente de la curva de Fuerza versus Deformación) se comienza a suavizar, observándose un comportamiento no lineal, debido a la no linealidad del material sometido a grandes deformaciones que van deteriorando sus propiedades.



**Figura 6.1:** Curva Fuerza – Deformación de material inelástico (Jorquera, 2014).

Teniendo en consideración lo anterior, es posible determinar la respuesta no lineal de un sistema estructural sometido a acciones dinámicas.

La ecuación de movimiento de un sistema no lineal de un grado de libertad sometido a una aceleración basal se puede expresar como:

$$m(\ddot{u} + \ddot{u}_g) + c\dot{u} + F_s(u) = 0 \quad (6.1)$$

La cual se puede escribir de la siguiente forma:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + F_s(u) = -m\ddot{u}_g \quad (6.2)$$

Donde:

$u$  : Desplazamiento.

$F_s$  : Fuerza restauradora.

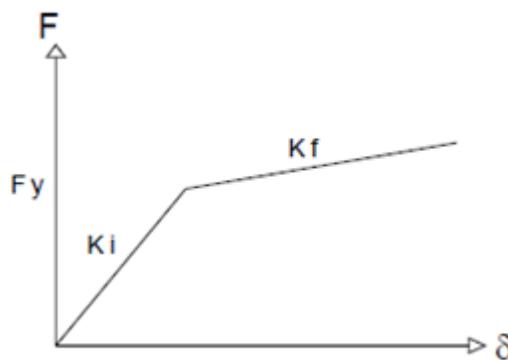
$\ddot{u}_g$  : Aceleración del suelo.

$c$  : Constante de amortiguamiento.

$m$  : Masa del sistema.

En la ecuación (6.2), la Fuerza restauradora  $F_s(u)$ , es la que hace que el sistema no sea lineal, es decir, la rigidez varía en función de la deformación.

Una manera de representar la variación de la rigidez, es posible mediante un modelo histerético, el cual consiste en un modelo elasto – plástico bilineal. En la Figura 6.2 se representa la relación bilineal tradicional, el cual está formado por una rigidez elástica ( $K_i$ ), y una rigidez post – fluencia ( $K_f = \alpha \cdot K_i$ ).



**Figura 6.2:** Gráfico Fuerza – Deformación de modelo bilineal (Saavedra, 2005).

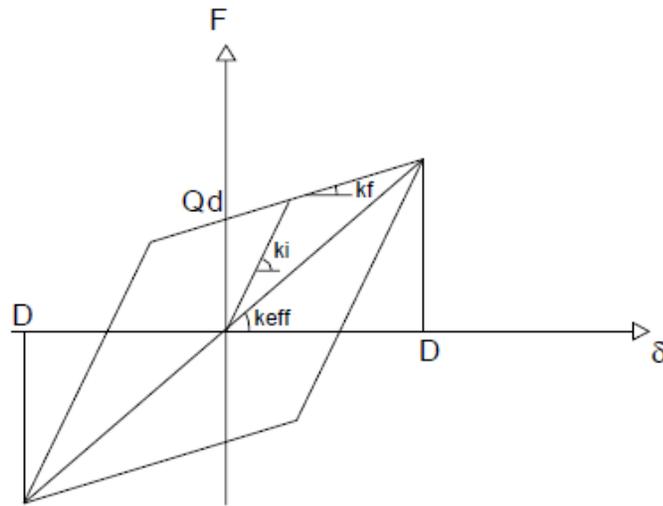
Donde:

$K_i$  : Rigidez inicial, asociada a la reacción del sistema frente a cargas de baja magnitud.

$K_f$  : Rigidez post-fluencia asociada a la reacción del sistema frente a cargas más altas del ciclo.

$F_y$  : Carga de fluencia, con su correspondiente desplazamiento de fluencia  $\delta_y$ .

La Figura 6.3 muestra en forma aproximada la curva de histéresis de la Figura 6.2, la cual representa un modelo bilineal, donde  $Q_d$  corresponde a la Fuerza para deformación nula. Al observar la curva de histéresis es posible visualizar que al iniciar la carga, el sistema tiene una rigidez elástica ( $k_i$ ), sin embargo, cuando la resistencia interna alcanza el estado plástico, el sistema fluye a lo largo del plató con la rigidez post – fluencia ( $k_f$ ).



**Figura 6.3:** Curva de histéresis aproximada de modelo bilineal (Saavedra, 2005).

El método que se utiliza para resolver la ecuación de movimiento para un sistema no lineal, es el método de integración paso a paso (Paz, 1996). Este método considera la ecuación (6.2) en su forma incremental:

$$m\Delta\ddot{u} + c\Delta\dot{u} + \Delta F_s(u) = -m\Delta\ddot{u}_g \quad (6.3)$$

La respuesta es calculada para sucesivos incrementos de tiempo  $\Delta t$ . Las condiciones de equilibrio dinámico se establecen al comienzo de cada intervalo, para posteriormente calcular en forma aproximada la respuesta para un incremento de tiempo, teniendo en consideración la suposición que la rigidez y el amortiguamiento en función del desplazamiento y velocidad respectivamente ( $k(u)$  y  $c(\dot{u})$ ), permanecen constantes durante el intervalo de tiempo. Al comienzo de cada incremento, se consideran en el análisis las características no lineales de la rigidez y amortiguamiento, lo que resulta en un comportamiento no lineal de manera aproximada

del sistema por una secuencia de sucesivos sistemas lineales. Para poder realizar la integración paso a paso, se recurre al método de aceleración lineal, el cual considera que la aceleración varía linealmente durante el intervalo de tiempo.

Suponiendo que la aceleración es una función lineal durante el intervalo de tiempo  $t_i \leq t \leq t_{i+1}$ , es posible expresarla de la siguiente manera:

$$\ddot{y}(t) = \ddot{y}_i + \frac{\Delta\ddot{y}_i}{\Delta t} (t - t_i) \quad (6.4)$$

Donde la aceleración incremental  $\Delta\ddot{y}_i$  se define como:

$$\Delta\ddot{y}_i = \ddot{y}(t_i + \Delta t) - \ddot{y}(t_i) \quad (6.5)$$

Al integrar dos veces con respecto al tiempo  $\ddot{y}(t)$  entre los límites de integración  $t_i$  y  $t$  se obtiene la velocidad y el desplazamiento en función del tiempo:

$$\dot{y}(t) = \dot{y}_i + \ddot{y}_i(t - t_i) + \frac{1}{2} \frac{\Delta\ddot{y}_i}{\Delta t} (t - t_i)^2 \quad (6.6)$$

$$y(t) = y_i + \dot{y}_i(t - t_i) + \frac{1}{2} \ddot{y}_i(t - t_i)^2 + \frac{1}{6} \frac{\Delta\ddot{y}_i}{\Delta t} (t - t_i)^3 \quad (6.7)$$

Evaluando las ecuaciones (6.6) y (6.7) en el instante  $t = t_i + \Delta t$  se tiene:

$$\Delta\dot{y}_i = \ddot{y}_i\Delta t + \frac{1}{2} \Delta\ddot{y}_i\Delta t \quad (6.8)$$

$$\Delta y_i = \dot{y}_i\Delta t + \frac{1}{2} \ddot{y}_i\Delta t^2 + \frac{1}{6} \Delta\ddot{y}_i\Delta t^2 \quad (6.9)$$

Al combinar las ecuaciones (6.8) y (6.9) es posible obtener el incremento de aceleración y velocidad:

$$\Delta\ddot{y}_i = \frac{6}{\Delta t^2} \Delta y_i - \frac{6}{\Delta t} \dot{y}_i - 3\ddot{y}_i \quad (6.10)$$

$$\Delta\dot{y}_i = \frac{3}{\Delta t} \Delta y_i - 3\dot{y}_i - \frac{\Delta t}{2} \ddot{y}_i \quad (6.11)$$

Reemplazando las ecuaciones (6.10) y (6.11) en la ecuación (6.3) y considerando  $\Delta F_s = k_i \Delta y_i$  se obtiene:

$$m \left[ \frac{6}{\Delta t^2} \Delta y_i - \frac{6}{\Delta t} \dot{y}_i - 3\ddot{y}_i \right] + c_i \left[ \frac{3}{\Delta t} \Delta y_i - 3\dot{y}_i - \frac{\Delta t}{2} \ddot{y}_i \right] + k_i \Delta y_i = \Delta F_i \quad (6.12)$$

Reordenando los términos se tiene que:

$$\bar{k}_i \Delta y_i = \Delta \bar{F}_i \quad (6.13)$$

Donde  $\bar{k}_i$  es la constante equivalente del resorte, la cual está dada por:

$$\bar{k}_i = k_i + \frac{6m}{\Delta t^2} + \frac{3c_i}{\Delta t} \quad (6.14)$$

Y  $\Delta \bar{F}_i$  es la fuerza equivalente incremental, que se puede expresar como:

$$\Delta \bar{F}_i = \Delta F_i + m \left[ \frac{6}{\Delta t} \dot{y}_i + 3\ddot{y}_i \right] + c_i \left[ 3\dot{y}_i + \frac{\Delta t}{2} \ddot{y}_i \right] \quad (6.15)$$

Teniendo en consideración lo anterior, el desplazamiento incremental se resuelve:

$$\Delta y_i = \frac{\Delta \bar{F}_i}{\bar{k}_i} \quad (6.16)$$

Por lo tanto, es posible determinar en el instante  $t_{i+1} = t_i + \Delta t$  el desplazamiento, la velocidad y la aceleración:

$$y_{i+1} = y_i + \Delta y_i \quad (6.17)$$

$$\dot{y}_{i+1} = \dot{y}_i + \Delta \dot{y}_i \quad (6.18)$$

$$\ddot{y}_{i+1} = \frac{1}{m} \left[ F(t_{i+1}) - F_{Disipador,i+1} - F_{Resorte,i+1} \right] \quad (6.19)$$

Al calcular en el instante  $t_{i+1} = t_i + \Delta t$  el desplazamiento, la velocidad y la aceleración, el procedimiento anteriormente descrito se repite para calcular estas cantidades en el siguiente paso.

## 6.2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Se realiza un análisis no lineal a un modelo estructural simplificado, basado en un oscilador de 1 grado de libertad, de manera de representar los principales edificios chilenos de hormigón armado que se vieron dañados sustancialmente por el terremoto del Maule el 27 Febrero de 2010 en la Región Metropolitana.

El modelo utilizado en este trabajo consta con características de un edificio de muros chileno estándar para el uso habitacional, con 19 pisos y 2 subterráneos (Jorquera, 2014). Las principales características del edificio se presentan a continuación:

- Planta piso tipo: 600 [m<sup>2</sup>].
- Planta piso subterráneo: 900 [m<sup>2</sup>].
- Número de pisos: 19 y 2 subterráneos.
- Altura piso tipo: 2.5 [m].
- Altura de subterráneo: 2.8 [m].
- Altura Total: 53.1 [m].
- Período: 1.025 [seg].
- Peso sísmico: 13200 [Tonf].
- Masa sísmica: 1345 [Tonf · seg<sup>2</sup> / m].

Con las características anteriormente definidas, se pretende utilizar un modelo de un oscilador de un grado de libertad, equivalente al primer modo fundamental de la estructura. En la Figura 6.4 se muestra un oscilador de un grado de libertad con rigidez  $k$ , masa  $m$ , amortiguamiento  $c$ , el cual está sometido a una aceleración basal  $\ddot{u}_g(t)$ , deformándose lateralmente un desplazamiento  $u$  (desplazamiento de techo de la estructura para primer modo).

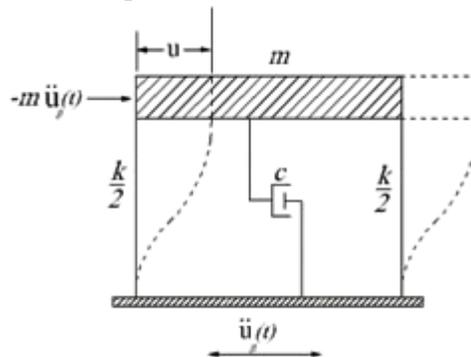


Figura 6.4: Oscilador de un grado de libertad (Jorquera, 2014).

La ecuación de movimiento para un sistema de N grados de libertad sometida sólo al movimiento del suelo es:

$$[m]\{\ddot{u}(t)\} + [\Gamma]\ddot{u}_g + [c]\{\dot{u}(t)\} + [k]\{u(t)\} = 0 \quad (6.20)$$

Donde:

$\{\Gamma\}$  : Vector de coeficientes de influencia, donde cada componente de dicho vector representa la aceleración en la coordenada de desplazamiento  $i$  causada por una unidad de aceleración en la base. En este caso, el vector de influencia es  $\{\Gamma\} = \{1\}_{N \times 1}$ , es decir, un vector con componentes iguales a 1.

El desplazamiento relativo a la base se puede representar usando superposición modal:

$$\{u(t)\} = [\phi]_r \{q_r(t)\} \quad (6.21)$$

$$\{\dot{u}(t)\} = [\phi]_r \{\dot{q}_r(t)\} \quad (6.22)$$

$$\{\ddot{u}(t)\} = [\phi]_r \{\ddot{q}_r(t)\} \quad (6.23)$$

Donde:

$\phi$  : Modo de vibración.

$q_r$  : Amplitud modal.

$r$  : Número de modos considerado en el análisis ( $r=1$ , para el caso de este trabajo).

Sustituyendo las ecuaciones anteriores en la ecuación de movimiento (6.20) se tiene:

$$[m][\phi]\{\ddot{q}(t)\} + [c][\phi]\{\dot{q}(t)\} + [k][\phi]\{q(t)\} = -[m]\{\Gamma\}\ddot{u}_g \quad (6.24)$$

Premultiplicando la ecuación (6.24) por  $[\phi]^T$ , y teniendo en consideración que la matriz de masa, rigidez y amortiguamiento modal son matrices diagonales, la ecuación de movimiento para el nuevo sistema queda desacoplada y el sistema de  $N$  grados de libertad queda representado por  $N$  osciladores de 1 grado de libertad.

$$M_r \ddot{q}_r(t) + C_r \dot{q}_r(t) + K_r q_r(t) = P_{ef_r}(t) \quad (6.25)$$

Donde:

$M_r = \{\phi\}_r^T [m] \{\phi\}_r$  : Masa del modo  $r$ .

$C_r = \{\phi\}_r^T [c] \{\phi\}_r$  : Amortiguamiento del modo  $r$ .

$K_r = \{\phi\}_r^T [k] \{\phi\}_r$  : Rigidez del modo  $r$ .

$P_{ef_r} = -L_r \ddot{u}_g(t)$  : Fuerza modal efectiva.

El término  $L_r$  es el factor de participación modal y está dado por:

$$L_r = (\{\phi\}_r^T [m] \{\Gamma\}) \quad (6.26)$$

Las propiedades del primer modo de la estructura se determinan a partir de un análisis para un sistema de 21 grados de libertad, para el cual se identifica la masa y la rigidez de los pisos, las formas modales, las masas y rigideces modales y el factor de participación modal.

Las características de la estructura se presentan a continuación:

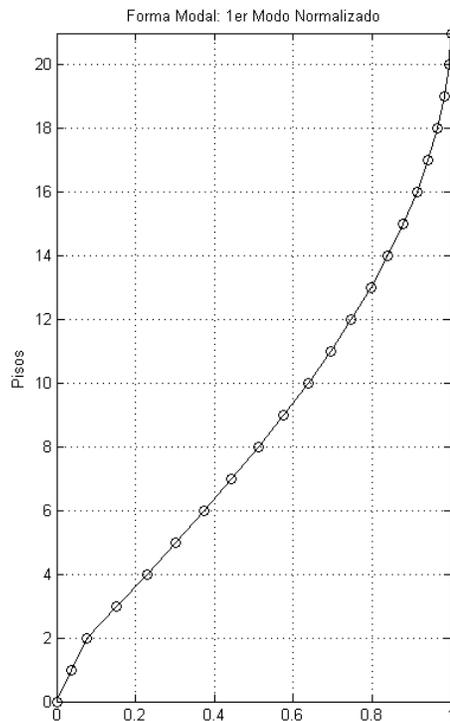
$$- \text{ Matriz de Masa piso tipo } (M_{PisoTipo}) = \begin{bmatrix} 60 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 60 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 60 \end{bmatrix} \text{ [Tonf} \cdot \text{seg}^2 / \text{m}]$$

$$- \text{ Matriz de Masa Subterráneo } (M_{Subterráneo}) = \begin{bmatrix} 90 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 90 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 90 \end{bmatrix} \text{ [Tonf} \cdot \text{seg}^2 / \text{m}]$$

$$- \text{ Matriz de Rigidez piso tipo } (K_{PisoTipo}) = \begin{bmatrix} 360000 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 360000 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 360000 \end{bmatrix} \text{ [Tonf} / \text{m}]$$

$$- \text{ Matriz de Rigidez subterráneo } (K_{Subterráneo}) = \begin{bmatrix} 720000 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 720000 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 720000 \end{bmatrix} \text{ [Tonf} / \text{m}]$$

- Los valores de rigidez se obtienen por iteración, teniendo en consideración que para el análisis se obtenga un período para el primer modo igual a 1 segundo.
- Las formas modales ( $\phi$ ) y la frecuencia angular al cuadrado ( $\omega^2$ ) se obtienen a partir de los vectores y valores propios de  $(M^{-1} \cdot K)$ , respectivamente. El período ( $T$ ) se calcula como  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  y se normaliza las formas modales. En la Figura 6.5 se puede ver el gráfico del primer modo normalizado.



**Figura 6.5:** Forma primer modo (Jorquera, 2014).

- La Masa y Rigidez modal se obtienen respectivamente como  $Mm = \phi^T M \phi$  y  $Km = \phi^T K \phi$ .
- El Factor de participación modal está dado por  $Lm = \phi^T M \cdot e$ , donde  $e$  corresponde al vector de influencia, que en este caso corresponde a un vector con componentes igual a 1.
- La Masa efectiva del 1° modo se calcula como  $M_{eff} = \frac{Lm_1^2}{Mm_1}$ .

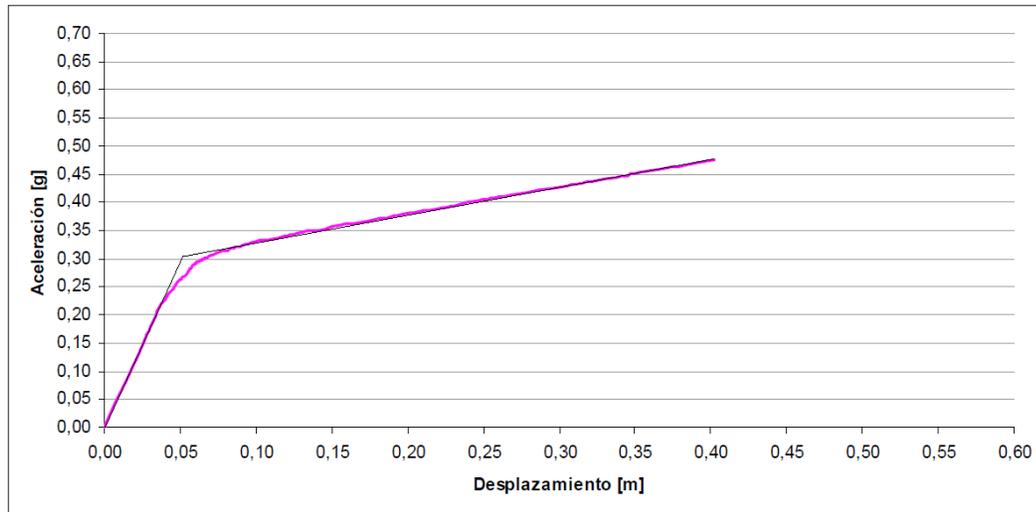
Con las características anteriormente descritas y del análisis correspondiente se obtienen los siguientes resultados:

- $Mm1 = 616.4$  [Tonf·seg<sup>2</sup> / m].
- $Km1 = 21692$  [Tonf / m].
- $Cm1 = 365.66$  [Tonf·seg / m], para una razón de amortiguamiento ( $\beta$ ), de un 5%.
- $Lm1 = 789.2$  [Tonf·seg<sup>2</sup> / m].
- $M_{eff} = 1011$  [Tonf·seg<sup>2</sup> / m], correspondiente a un 75% de la masa total.

También se considera:

- Pendiente de rigidez post-fluencia,  $\alpha = 8\%$ .
- Resistencia de fluencia,  $Ry = 2975.4$  [Tonf].

En este trabajo se considera la pendiente de rigidez post-fluencia, a partir del estudio desarrollado en la memoria “Análisis comparativo de vulnerabilidad y costo entre edificios de marcos y muros con una misma superficie en planta” (Droguett, 2008), en la cual se analiza un modelo de 20 pisos de características similares al edificio estudiado en este capítulo. En la Figura 6.6 se muestra la curva de capacidad obtenida por Droguett, a la cual se le calcula en forma aproximada la pendiente luego de la fluencia.



**Figura 6.6:** Curva capacidad para un modelo de 20 pisos (Droguett, 2008).

Si se asume que la no linealidad se concentra en el primer modo, la fuerza  $R_y$  se calcula mediante la curva de capacidad obtenida por Droguett (2008), realizando un ajuste de curva bilineal para identificar el cambio de pendiente, por lo tanto, se estima la razón  $R_y/m$  igual a  $0.3[g]$ .

### 6.3. RESULTADOS

Luego de haber descrito el modelo anterior, se procede a calcular su respuesta para los registros de la Tabla 4.5 compatibilizados al espectro de la Norma Chilena NCh433 y al espectro con dos Peaks, tanto para los niveles de PGA de la base de datos de registros compatibilizados denominados “PGASeleccionados” (rango de PGA entre 0.1g a 1.4g), como para los niveles de PGA “AoSeleccionados” (aceleración efectiva máxima de norma: 0.2g, 0.3g 0.4g), utilizando un margen de error de un 5% y 20% con respecto al Target.

La respuesta se calcula para cada registro compatibilizado a los diferentes Target (ver Figuras 4.1 y 4.2), para lo cual se genera un archivo de datos de Matlab con 25 estructuras, donde se identifica el Evento, la Estación, y el tipo de espectro para realizar la compatibilización (EspectroNorma y Espectro2Peaks), en los cuales se guarda la respuesta para los distintos niveles de error, niveles de PGA y tipos de Suelos, para posteriormente generar las curvas que se describen en el siguiente capítulo.

## CAPÍTULO 7. CURVAS DE FRAGILIDAD

Ante eventos sísmicos importantes que ocurren en distintas zonas geográficas del mundo, los niveles de daños en estructuras con un comportamiento sísmico inadecuado pueden ser devastadores, ocasionando en la mayoría de los casos pérdidas humanas y económicas. Una manera de mejorar el diseño de estructuras, es realizar estudios de riesgo sísmico en zonas urbanas o un sitio determinado, que permitan evaluar la vulnerabilidad sísmica en dichas zonas y estimar la probabilidad de daño que se puede sufrir a causa de un sismo, lo cual se puede plasmar en curvas de fragilidad.

La vulnerabilidad sísmica está estrechamente relacionada con los conceptos de riesgo y peligro sísmico, por lo tanto, resulta importante tener una aclaración de estos términos para poder entender el fin de este capítulo, el cual es la generación de curvas de fragilidad de registros compatibles al espectro de la Norma NCh 433 Of. 96 (NCh433) y el espectro con dos peaks de Ruiz y Saragoni (2008).

En primer lugar, la vulnerabilidad sísmica de una estructura, grupo de estructuras o de una zona urbana completa, se puede definir como su predisposición intrínseca a sufrir daño ante la ocurrencia de un movimiento sísmico, y está asociada directamente con sus características físicas y estructurales de diseño (Barbat, 1998).

Por otra parte, el peligro sísmico se refiere a la probabilidad de que se produzca un movimiento sísmico potencialmente destructivo en un determinado lugar y tiempo. Mientras que el riesgo sísmico se puede entender como el grado de pérdidas esperadas que sufren las estructuras durante el lapso de tiempo que permanecen expuestas a la acción sísmica.

Los conceptos anteriormente descritos se relacionan entre sí como:

$$\text{Riesgo} = \text{Peligro} \cdot \text{Vulnerabilidad} \quad (7.1)$$

Dada la relación anterior, es posible observar que para mitigar el riesgo sísmico de una zona, es necesario disminuir el peligro sísmico, la vulnerabilidad sísmica y el costo de reparación de las estructuras afectadas ante un evento sísmico mejorando el comportamiento sísmico de los edificios de la zona. Sin embargo, se debe considerar que el peligro sísmico está condicionado por las características tectónicas del lugar, resultando ser una variable que no se puede controlar. Por lo tanto, para reducir el riesgo, es necesario disminuir la vulnerabilidad sísmica, y una herramienta para poder desarrollarla, son las curvas de fragilidad, las cuales representan una medida de la vulnerabilidad sísmica de una estructura en términos probabilísticos.

Las curvas de fragilidad permiten representar la probabilidad de que la respuesta de una estructura exceda un estado límite de daño (estado de daño), en función de un parámetro

representativo de la severidad del movimiento sísmico (PGA, PGV, etc). Para la generación de estas curvas, es necesario calcular la respuesta del sistema estructural ante diferentes niveles de demanda sísmica, donde generalmente para los sismos de alta intensidad, el comportamiento de los edificios es altamente no lineal, por esa razón se realiza un análisis que permita modelar este comportamiento. Finalmente a partir del procesamiento estadístico del nivel de daño encontrado, es posible generar las curvas de fragilidad.

## **7.1. ELEMENTOS PARA GENERACIÓN DE CURVAS DE FRAGILIDAD**

Los principales elementos necesarios para poder generar las curvas de fragilidad se presentan a continuación:

### **7.1.1. Parámetro indicador de la intensidad**

Como Parámetro Indicador de la Intensidad Sísmica (PIS) que caracteriza el nivel del terremoto, se selecciona la aceleración máxima del suelo (PGA).

### **7.1.2. Modelo estructural**

Se define el modelo analítico de la estructura, como una edificación típica chilena en base a muros de hormigón armado, con las propiedades equivalentes para un oscilador de un grado de libertad (masa, rigidez y amortiguamiento), el cual es sometido a la acción sísmica mediante registros compatibilizados al espectro de la Norma NCh433 y al espectro con dos peaks.

### **7.1.3. Parámetro indicador de daño**

Se define como Parámetro Indicador del Daño estructural (PID) característico de la respuesta estructural, el desplazamiento del techo.

### **7.1.4. Análisis dinámico no lineal**

La respuesta de la estructura frente a la demanda sísmica se conoce, debido al análisis dinámico no lineal de la estructura, obteniéndose las fuerzas y desplazamientos que se producen como consecuencia de un movimiento sísmico.

## **7.2. ESTADOS LÍMITES DE UNA ESTRUCTURA**

En forma general, se puede describir el nivel de desempeño como un estado límite de daño que representa una condición límite, la cual se establece en función de los posibles daños físicos sobre el edificio, la amenaza sobre la integridad física de los ocupantes de la edificación como consecuencia de estos daños y la funcionalidad de la estructura posterior al terremoto.

Se definen cuatro niveles de desempeño a partir de la Propuesta del Comité VISION 2000, los cuales se presentan a continuación (SEAO, 1995):

- A. Totalmente Operacional: Nivel de desempeño en el cual no ocurren daños. Las consecuencias sobre los usuarios de las instalaciones son despreciables. La edificación permanece totalmente segura para sus ocupantes. Todo el contenido y los servicios de la edificación permanecen funcionales y disponibles para su uso. En general no se requieren reparaciones, aunque pudiera presentarse cierto daño en elementos no estructurales y algunos acabados.
  
- B. Operacional: Nivel de desempeño en el cual ocurren daños moderados en elementos no estructurales y en el contenido de la edificación, e incluso algunos daños ligeros en elementos estructurales. El daño es limitado y no compromete la seguridad de la edificación que debería permanecer disponible para cumplir con sus funciones normales inmediatamente después del sismo, aunque los daños en elementos no estructurales pueden interrumpir parcialmente algunas funciones. En general, se requieren algunas reparaciones menores.
  
- C. Seguridad: Nivel de desempeño en el cual ocurren daños estructurales y no estructurales moderados en el edificio. Se reduce su rigidez y capacidad de resistir cargas laterales. Interrupción de servicios mecánicos, eléctricos y perturbaciones de las vías de escape de la edificación. Las instalaciones sufren un daño considerable y el edificio probablemente requerirá reparaciones importantes. Sin embargo, se debe garantizar la integridad de los usuarios.
  
- D. Pre-Colapso: Nivel de desempeño en el cual ocurren daños extremos, que aunque se mantiene la estabilidad global de la edificación, ésta se puede ver comprometida debido a la degradación de la rigidez lateral y la capacidad resistente de la estructura, aproximándose al colapso estructural. Se interrumpen servicios y vías de escape. La integridad física de los usuarios no se garantiza en este nivel y la reparación del edificio puede que no resulte económicamente factible.

Considerando estos niveles de desempeño sísmico, se definen estados de daños, los cuales están asociados a un desplazamiento objetivo representado como  $\delta/H$ , donde  $\delta$  es el desplazamiento lateral máximo del nivel superior con respecto a la base de la estructura y  $H$  es la altura del edificio (Guendelman et al, 1997).

En la Tabla 7.1 se muestran los niveles de desempeño con sus respectivos estados de daño y desplazamientos objetivos.

Tabla 7.1: Desplazamiento objetivo de Estados de daño.

Nivel de desempeño	Estado de daño	Desplazamiento objetivo $\delta / H$
Totalmente Operacional	No Daño	0.002
Operacional	Ligero	0.005
Seguridad a la vida	Moderado	0.015
Pre-Colapso	Severo	0.025
Colapso	Colapso	> 0.025

### 7.3. RESULTADOS

Para generar las curvas de fragilidad, se debe utilizar la respuesta no lineal calculada para el modelo estructural del capítulo 6, utilizando los registros de la Tabla 4.5 compatibilizados al espectro de la Norma Chilena NCh433 y espectro con dos Peaks, para los niveles de PGA de la base de datos de registros compatibilizados denominados “PGASeleccionados” (rango de PGA entre 0.1g a 1.4g). Teniendo en consideración lo anterior, se generan las curvas de fragilidad según la relación  $\delta / H$ , la cual determina los distintos estados de daño.

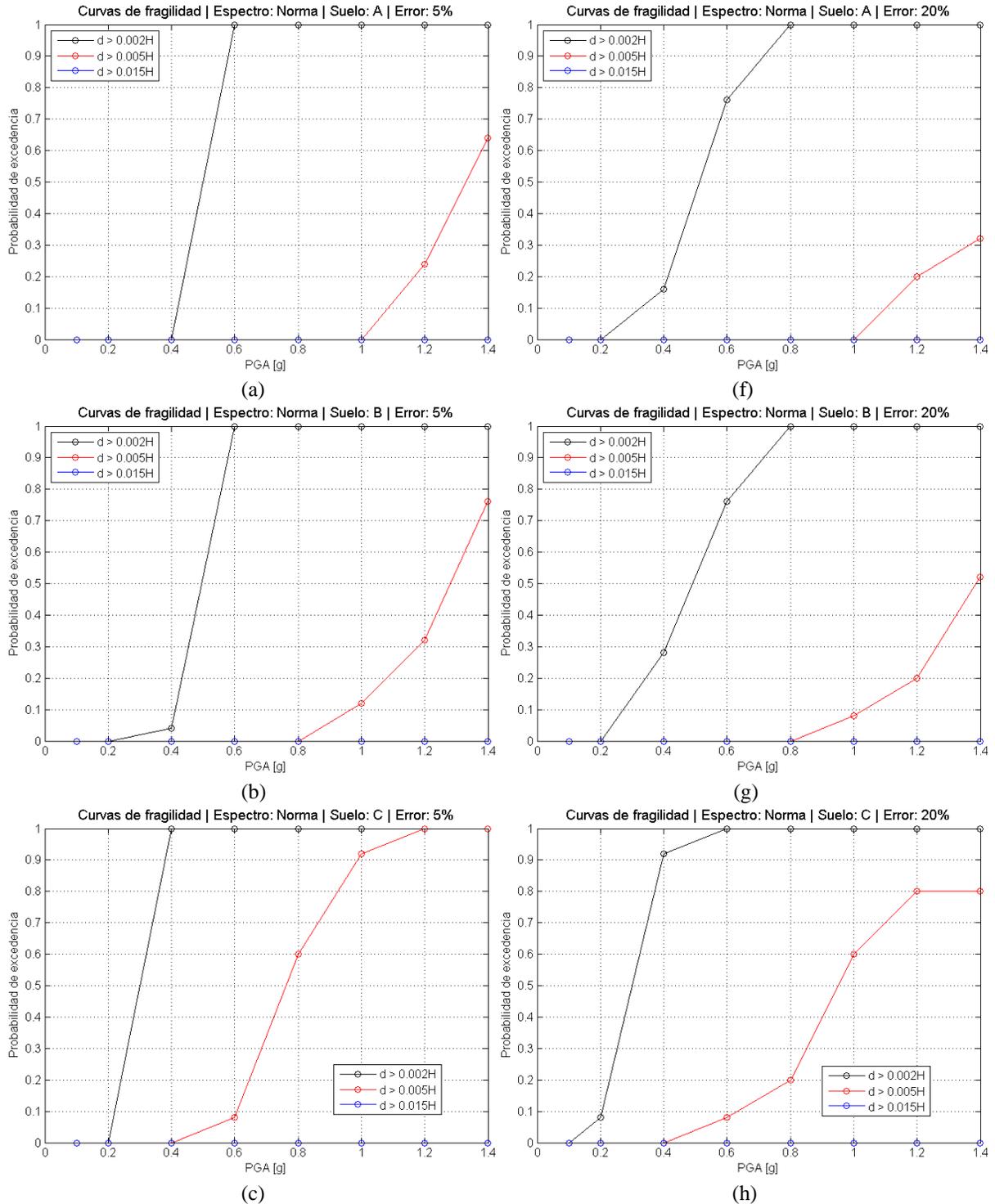
Las curvas de fragilidad se generan determinando para cada nivel de PGA la cantidad de respuesta de desplazamiento que cumplen las condiciones límites según los estados de daño mostrados en la Tabla 7.1, lo que permite en definitiva graficar una probabilidad en función del PGA.

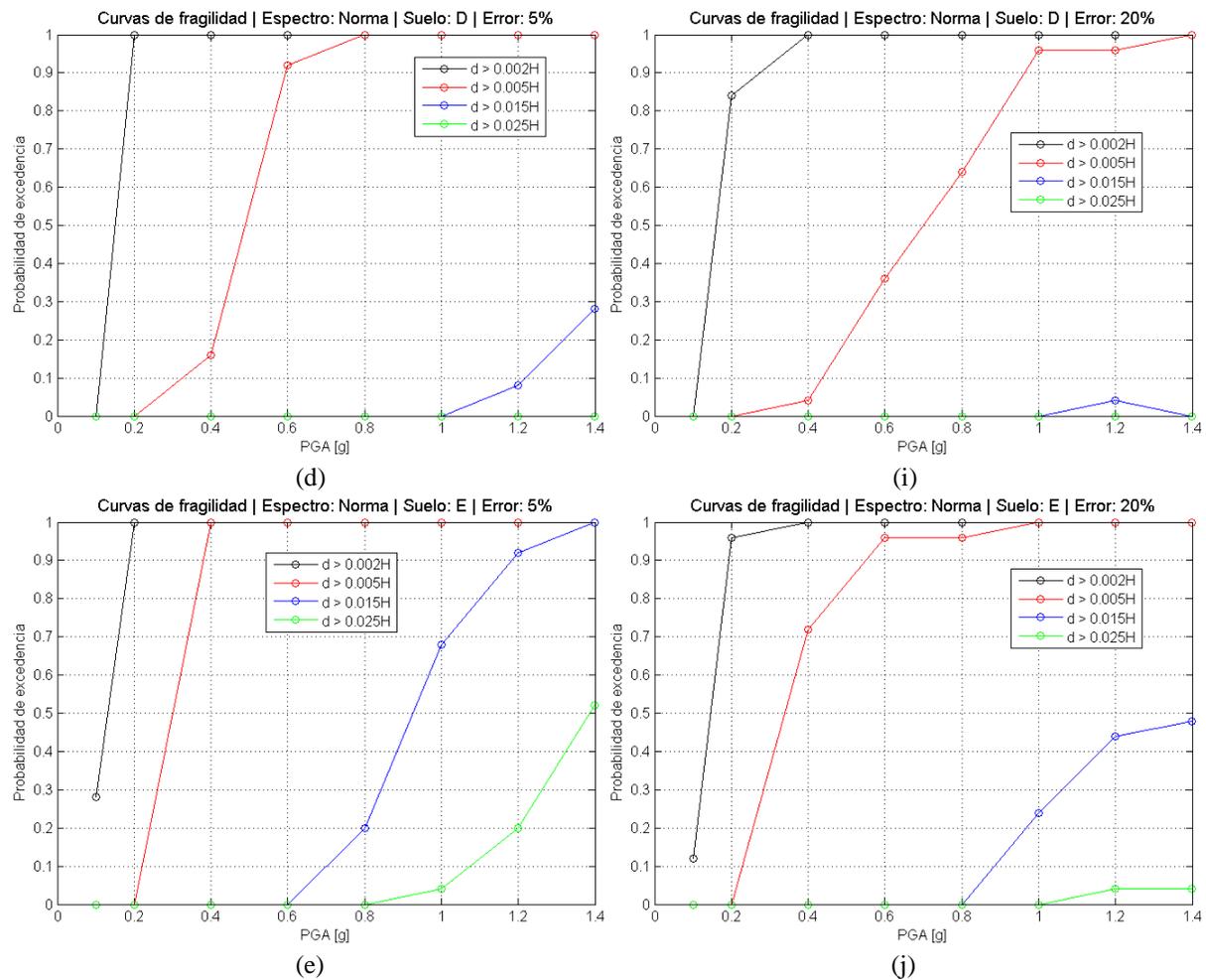
#### 7.3.1. Espectro de Norma, PGA Seleccionados

La Figura 7.1 muestra las curvas que se tienen a partir de los registros compatibilizados al espectro de la Norma Chilena NCh433 para los niveles de PGA de la base de datos de registros compatibilizados denominados “PGASeleccionados”, utilizando un margen de error de un 5% y 20% con respecto al Target. Se desprende de la figura, que a medida que el suelo exige mayor demanda sísmica (es decir, partiendo desde el suelo tipo A hasta terminar en el suelo tipo E), la probabilidad de daño aumenta.

Donde se puede observar mayor probabilidad de daño en dicha figura, es en el suelo tipo E (Figura 7.1 (e)), donde se grafican 4 curvas que identifican los límites de los estados de daño, generándose 5 zonas de interés. La zona que está por sobre la curva de color negro, define la probabilidad de que para un determinado PGA “no existe daño” en la estructura analizada en este trabajo. La zona que se ubica entre la curva de color negro y rojo, define la probabilidad de que para un determinado PGA existe un estado de “daño ligero”. La zona entre la curva roja y azul define la probabilidad de que exista “daño moderado”. Mientras que la zona entre la curva azul y

verde define la probabilidad de que exista “daño severo”. Y por último, la zona que está bajo la curva verde, define la probabilidad que exista “colapso”. Cabe destacar, que para la Figura 7.1 (e) (j) es posible observar para un PGA de 0.1g, que la curva negra no parte con una probabilidad de excedencia nula ( $d > 0.002H$ ), debido a que para ese nivel de PGA ya se tiene probabilidad de daño, sin embargo, la curva definitiva debe empezar para un PGA y probabilidad de excedencia nulos (ver Figura 7.9).



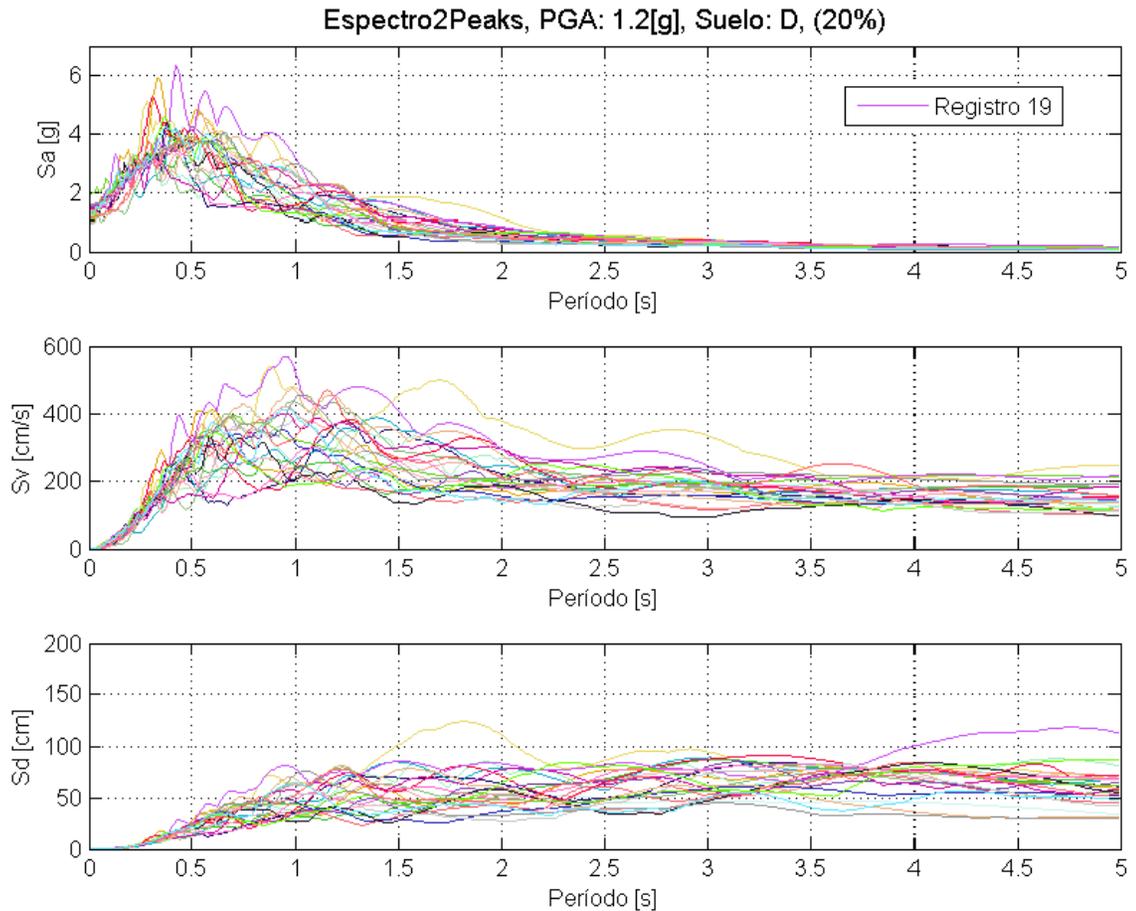


**Figura 7.1:** Curvas de Fragilidad para los registros compatibilizados al espectro de la Norma para cada tipo de Suelo de la Norma NCh433, utilizando varios niveles de PGA.

Al comparar los resultados utilizando un margen de error de un 5% y 20%, es posible ver que para un error de un 20% la probabilidad de daño es menor, con respecto a la de 5%, por lo tanto se puede concluir que el espectro de la norma chilena exige una mayor demanda en comparación con los registros que no se ven sustancialmente modificados por el proceso de compatibilización espectral utilizando un 20% de error.

Para el caso de la Figura 7.1 (i), se observa que para el PGA 1.2g de la curva azul, se obtiene probabilidad de excedencia, mientras que para los otros niveles de PGA de dicha curva no se observa este comportamiento. Esta condición se puede explicar debido que al realizar el proceso de compatibilización utilizando un 20% de error, la compatibilización no se ajusta completamente al Target, y por ende, los espectros de los registros compatibilizados tienen una gran variabilidad en sus períodos. Esto se puede ver de mejor manera en la Figura 7.2, en la cual se muestran los espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento de los registros seleccionados desde el Catálogo de Terremotos de Jorquera (ver Tabla 4.5), compatibilizados al espectro de la Norma NCh433 para un suelo tipo D, utilizando 20% de error y un nivel de PGA de 1.2g. En dicha Figura, es posible apreciar que hay un espectro de

aceleración que está por sobre los demás, en la mayoría de sus períodos, el cual se obtiene a partir del registro San Isidro para el terremoto de Valparaíso en el año 1985 (Registro 19 en la Tabla 4.5 y Figura 7.2). Precisamente, fue el registro 19 el único con el que se obtuvo una mayor respuesta de desplazamiento para el modelo estructural del capítulo anterior ( $\delta / H = 0.0159$ ), en comparación con el desplazamiento objetivo del estado de daño moderado ( $\delta / H = 0.015$ ).



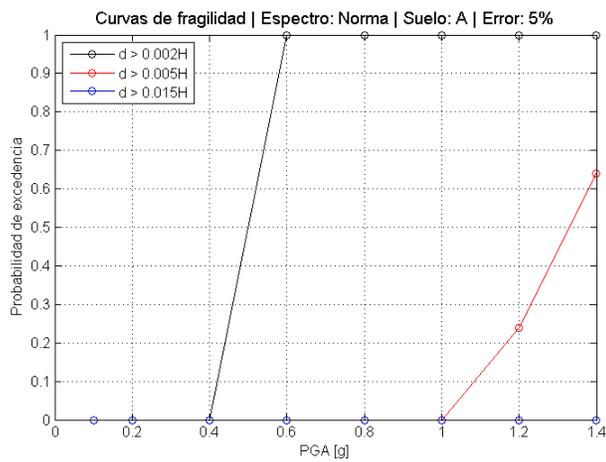
**Figura 7.2:** Espectros de respuesta para 25 registros de base de datos compatibilizados al espectro de la Norma para un suelo tipo D, utilizando un PGA de 1.2g, con un 20% de error.

### 7.3.2. Espectro de Norma y dos Peaks

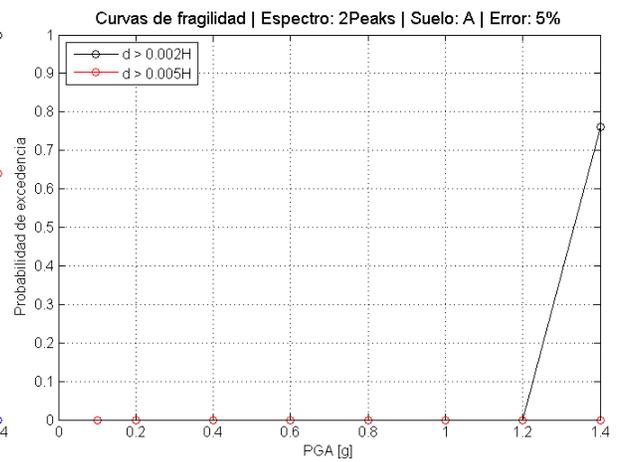
Luego de analizar los resultados para los registros compatibilizados al espectro de la Norma Chilena NCh433, se presenta en la Figura 7.3 una comparación de las curvas obtenidas que se tienen a partir de los registros compatibilizados, tanto para el espectro de la Norma Chilena NCh433, como para el espectro con dos Peaks, considerando cada tipo de suelo de la norma y los niveles de PGA de la base de datos de registros compatibilizados denominados “PGAseleccionados”, utilizando un margen de error de un 5% con respecto al Target.

Al observar la comparación de los resultados al utilizar ambos espectros, es posible apreciar que para las curvas obtenidas utilizando el espectro con dos peaks, se tiene una menor probabilidad de daño en la mayoría de los casos, e inclusive para el suelo tipo A y B no se

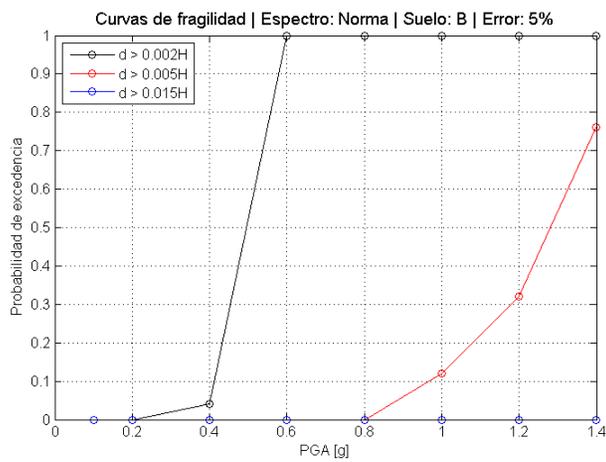
observa daño moderado, mientras que para el caso de la Norma si se observan zonas con daño ligero y moderado. Al igual que en los resultados anteriores, en ambos casos se ve que el estado de daño aumenta desde el suelo tipo A hasta el suelo tipo E.



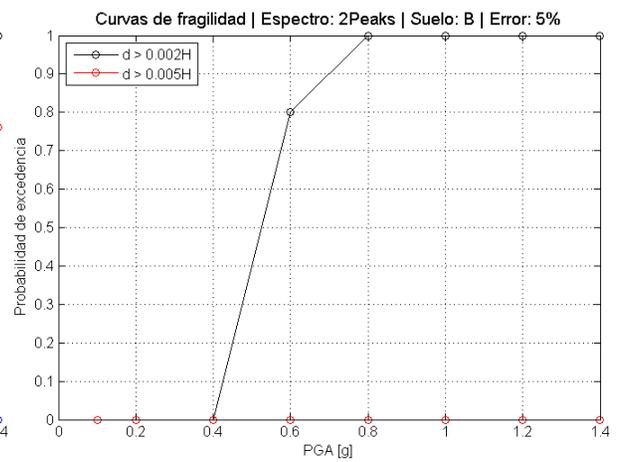
(a)



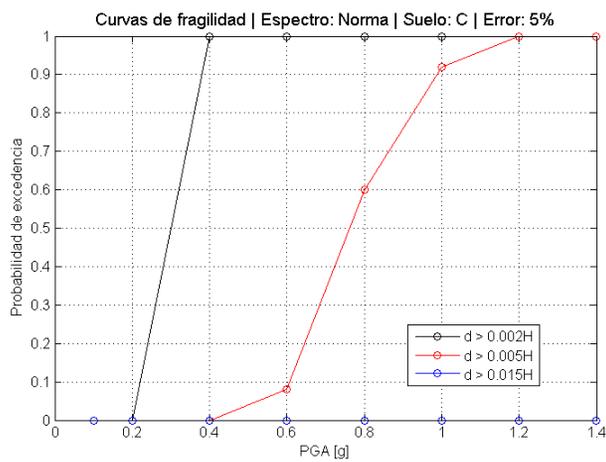
(f)



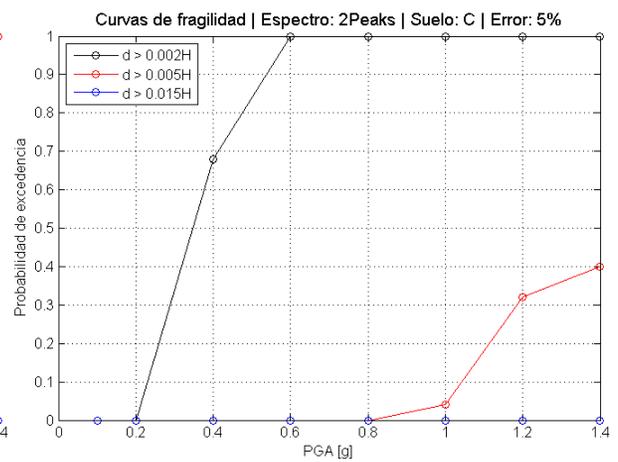
(b)



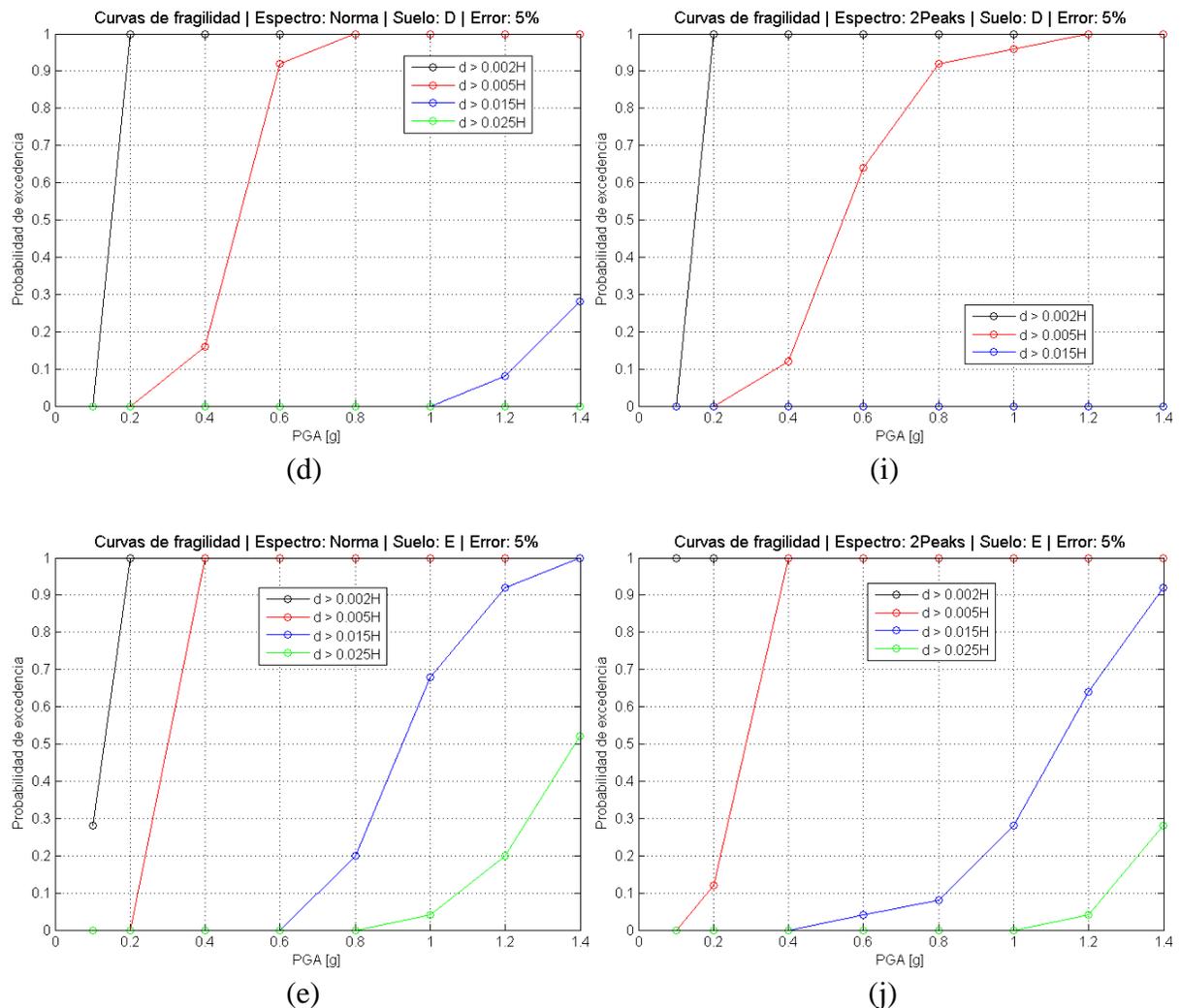
(g)



(c)



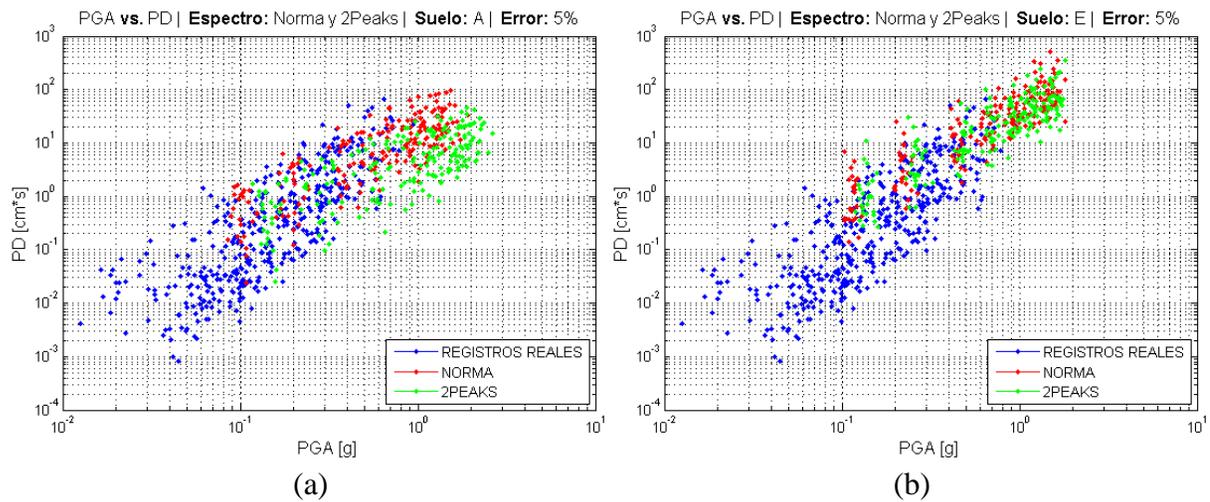
(h)



**Figura 7.3:** Curvas de Fragilidad para los registros compatibilizados al espectro de la Norma y dos Peaks para cada tipo de Suelo de la Norma NCh433, utilizando varios niveles de PGA, para un 5% de error.

Una explicación por la cual se obtuvieron tales diferencias al utilizar distintos espectros como Target, se puede apreciar de mejor manera observando la Figura 7.4, la cual muestra el potencial destructivo en función del PGA de los registros compatibilizados al espectro de la Norma y espectro con dos Peaks para el suelo tipo A y E, de manera de tener una comparación al usar ambos espectros para el mismo tipo de suelo. De la Figura 7.4 (a), se puede observar que la tendencia del potencial destructivo para el caso del espectro con dos Peaks es menor comparado con el espectro de la Norma para el suelo tipo A, mientras que para la Figura 7.4 (b), se aprecia que la tendencia del potencial destructivo es similar al emplear ambos espectros para el suelo tipo E. Por lo tanto, se desprende de las Figura 7.3 y 7.4, que la destructividad sísmica es mayor al utilizar el espectro de la Norma, con lo cual se puede concluir, que al diseñar estructuras con este tipo de espectro se obtiene una respuesta mayor, mientras que para el caso del espectro con dos Peaks, el cual está realizado para la tendencia de los espectros de registros reales que han ocurrido en Chile, da una respuesta menor. De manera simple, mediante dichas figuras, se obtiene una relación entre el potencial destructivo de los registros y la respuesta no lineal de la estructura (la cual se desprende de las curvas de fragilidad), es decir, para valores altos de

potencial destructivo, se obtiene una mayor respuesta de la estructura, mientras que para valores bajos de potencial destructivo, se tiene una respuesta menor.

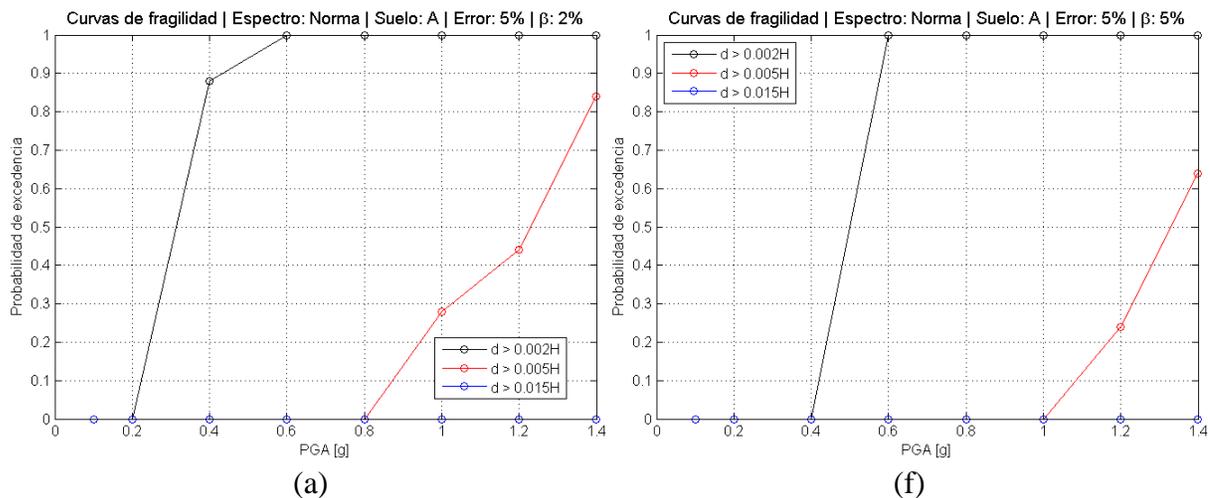


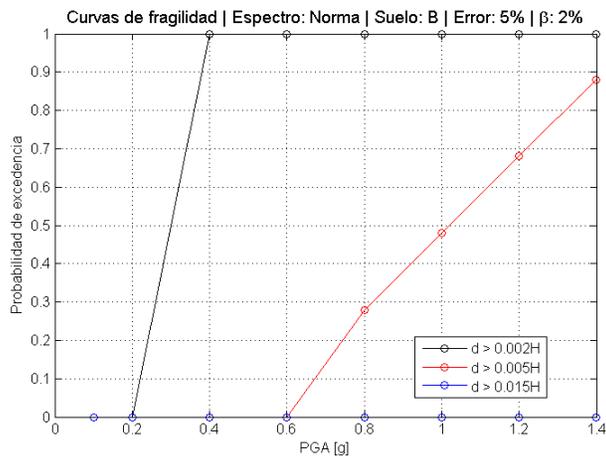
**Figura 7.4:** Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro de la Norma y espectro con dos Peaks para Suelo tipo A.

Los gráficos para las curvas de los registros compatibilizados al espectro con dos peaks para los distintos tipos de suelo de la norma chilena, utilizando un error de un 20%, para varios niveles de PGA, se presentan en anexos y tienen el mismo análisis que en este capítulo (ANEXO E.1).

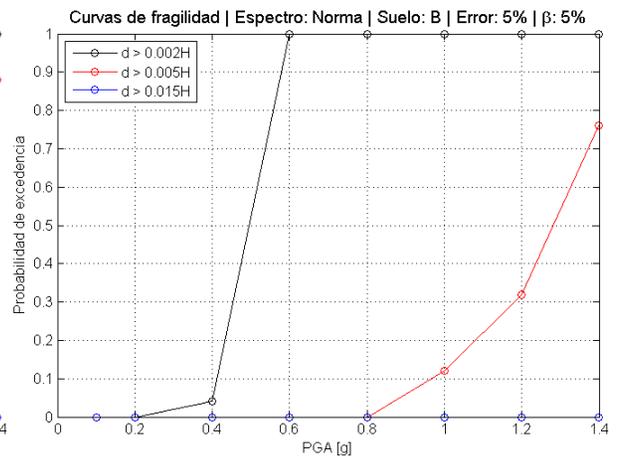
### 7.3.3. Curvas realizadas considerando $\beta=2\%$ en el modelo estructural

En la actualidad se ha visto para edificios altos mayores a 20 pisos, que la razón de amortiguamiento ( $\beta$ ) varía entre un 1% y un 3%. En la Figura 7.5 se muestran las curvas de fragilidad generadas para el modelo estructural del capítulo anterior, pero considerando una razón de amortiguamiento de 2% y 5%, el espectro de la Norma para todos los tipos de suelos, y un 5% de error, de manera de poder realizar una comparación entre dichas curvas.

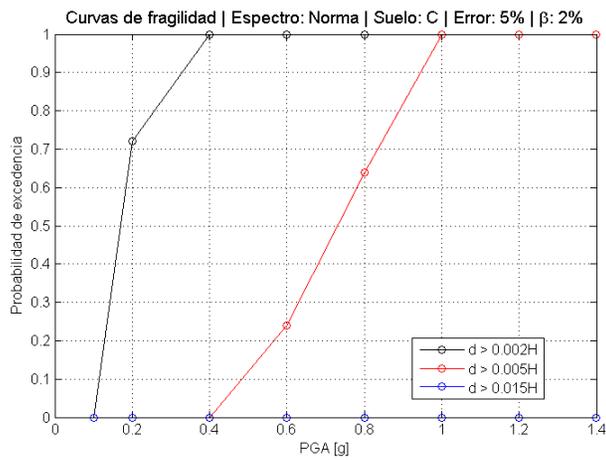




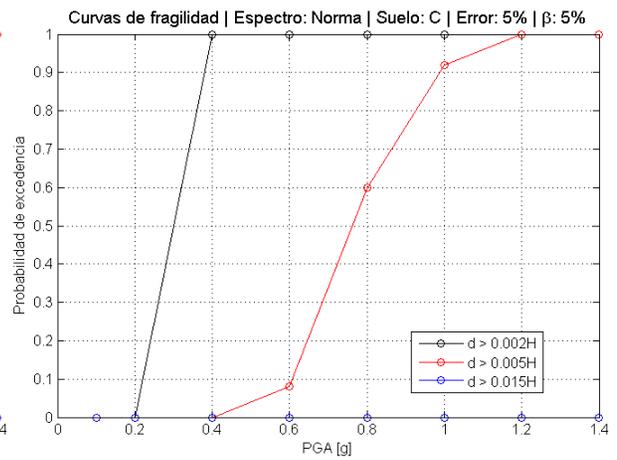
(b)



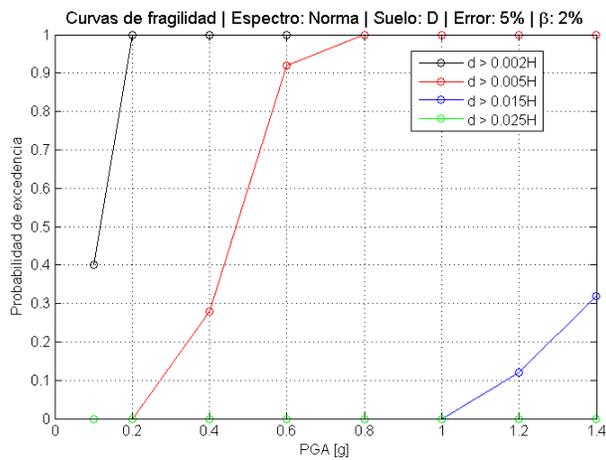
(g)



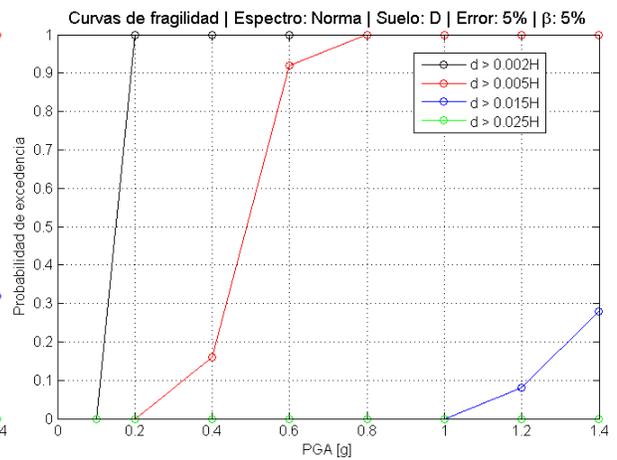
(c)



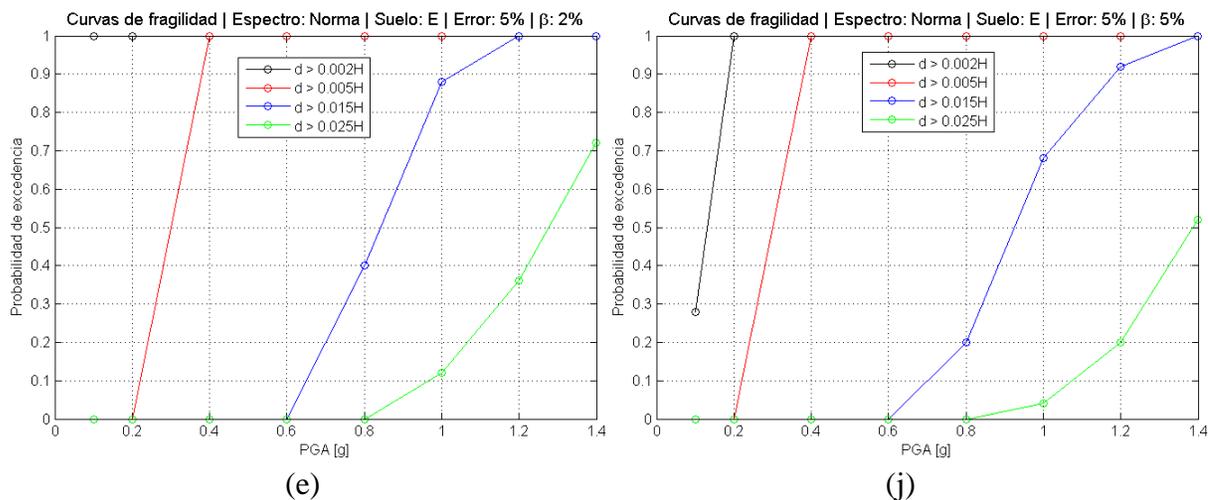
(h)



(d)



(i)



**Figura 7.5:** Curvas de Fragilidad para los registros compatibilizados al espectro de la Norma para cada tipo de Suelo de la Norma NCh433, utilizando varios niveles de PGA considerando una razón de amortiguamiento de 2% y 5%.

Como es posible observar a partir de la Figura 7.5, la probabilidad de daño es mayor al considerar una razón de amortiguamiento de 2% en comparación con los resultados obtenidos para un 5%, en la mayoría de los casos, sin embargo, para suelos que exigen mayor demanda sísmica, tales como los suelos tipo D y E, la variación es menor.

En anexos se muestran las curvas de fragilidad generadas para el espectro con dos Peaks, considerando una razón de amortiguamiento de 2% y 5%, para todos los tipos de suelos, teniendo en cuenta un 5% de error (ANEXOS E.2).

## 7.4. COMPARACIÓN CON CURVAS DE JORQUERA (2014)

A partir de los resultados anteriores es posible efectuar una comparación entre las curvas obtenidas para los registros compatibilizados y las curvas generadas a partir del catálogo de terremotos realizado en el trabajo de título de Jorquera (2014).

Los registros del catálogo de Jorquera son escalados de manera de obtener un rango de PGA entre 0.1g y 1.5g con un incremento igual a 0.1g. Esto significa que cada registro real genera 15 registros escalados para los cuales se calcula la respuesta al modelo estructural simplificado del capítulo anterior.

El procedimiento para realizar lo anterior, consiste en generar un registro normalizado ( $\overline{Reg}_n$ ), lo cual se obtiene dividiendo el registro real por su aceleración máxima del suelo ( $Reg / PGA$ ), tal que:

$$\overline{Reg}_n = \frac{Reg}{PGA} \quad (7.2)$$

Luego se debe generar un vector “ $a$ ” con los PGA que se pretende obtener, es decir:

$$a = [0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5]$$

Finalmente, el registro escalado se calcula como:

$$Reg_i = a_i \cdot \overline{Reg_n} \quad (7.3)$$

Donde:

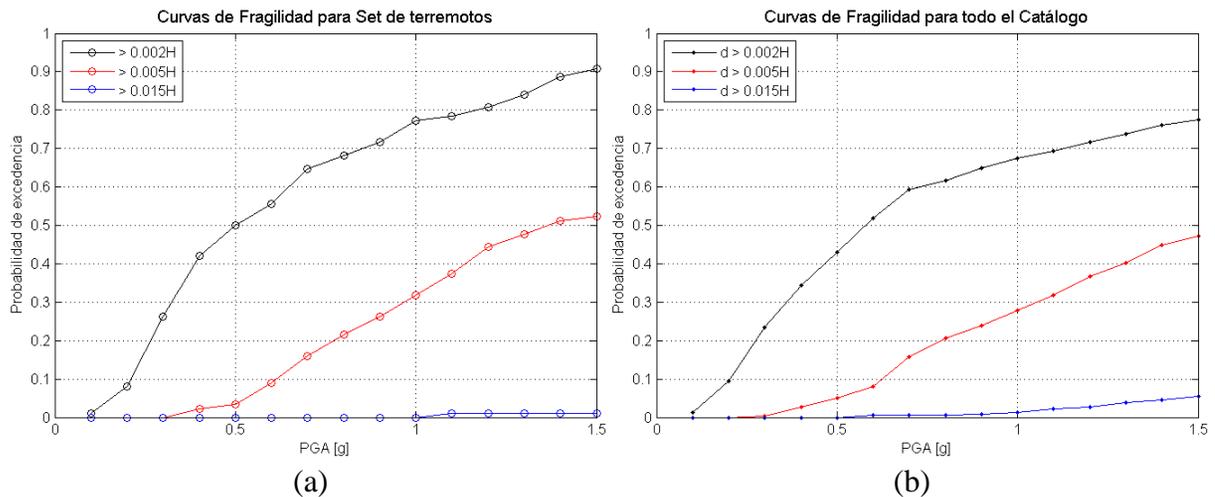
$Reg_i$  : Registro escalado para el nivel de PGA  $i$  de vector  $a$ .

$a_i$  : Nivel de PGA  $i$  de vector  $a$ .

### 7.4.1. Curvas de Fragilidad de Jorquera

Las curvas de fragilidad generadas por Jorquera, se realizan a partir de 2 conjuntos de registros escalados. El primer conjunto consiste en aquellos registros reales por sobre un PGA de 0.3g (set de terremotos), debido a que este conjunto presenta una mayor probabilidad de obtener resultados similares a los reales al ser escalados, mientras que para registros con menor PGA que 0.3g, aumenta la probabilidad de que los valores escalados no sean representativos de la realidad. El segundo conjunto corresponde a todos los registros del catálogo de terremotos (Jorquera, 2014).

En la Figura 7.6 se muestran las curvas de fragilidad generadas por Jorquera a partir de la respuesta del modelo estructural, mediante los 2 conjuntos de registros escalados; el set de terremotos, el cual considera 61 registros horizontales, y el conjunto de todos los registros del Catálogo, el cual toma en cuenta 406 registros horizontales.



**Figura 7.6:** Curvas de Fragilidad para Set de terremotos y para todo el Catálogo (Jorquera, 2014).

## 7.4.2. Comparación de curvas a partir de registros reales y registros compatibilizados

Teniendo en consideración la Figura anterior, es posible realizar una comparación de las curvas obtenidas por Jorquera mediante los 2 conjuntos de registros escalados (ver Figura 7.7), así como también se puede efectuar una comparación de las curvas obtenidas a partir de los registros reales de Jorquera, y los registros compatibilizados al espectro de la Norma NCh433 y espectro con dos peaks. En la Figura 7.8 se muestran las curvas para los registros compatibilizados al espectro de la Norma y dos peaks, considerando los suelos B y E, utilizando un 5% de error.

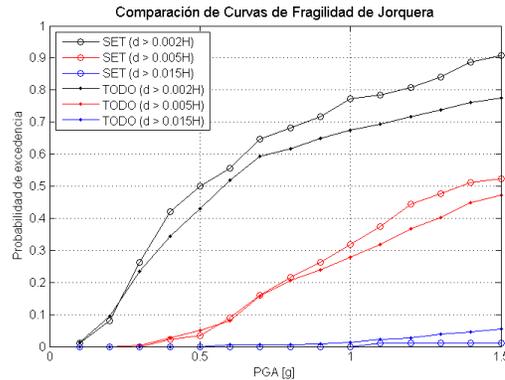


Figura 7.7: Comparación de Curvas de Fragilidad para Set de terremotos y para todo el Catálogo de Jorquera.

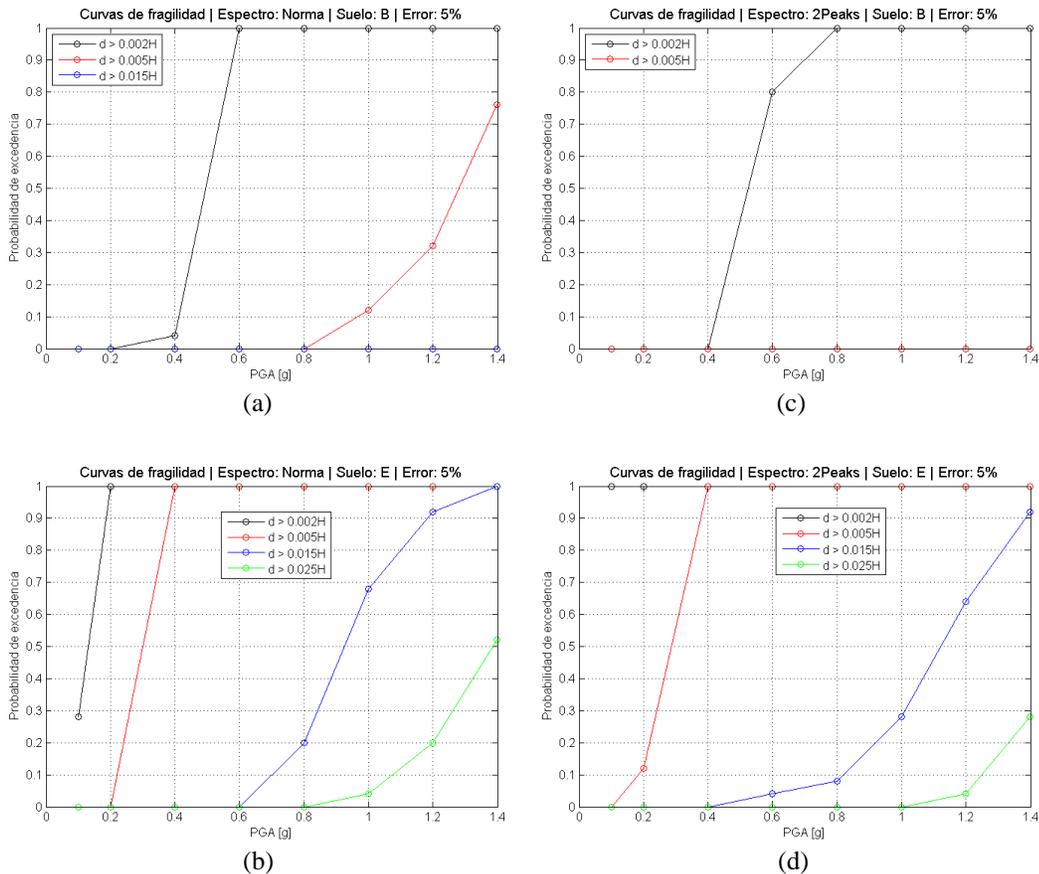


Figura 7.8: Curvas de Fragilidad mediante registros compatibilizados para suelos B y E.

En primer lugar, es posible apreciar de la Figura 7.7, que las curvas de fragilidad de Jorquera para el conjunto de registros por sobre un PGA de 0.3g (es decir, para el set de terremotos), muestran una mayor probabilidad de excedencia para los estados de daño ligero y moderado, en comparación con las curvas para el conjunto de todos los registros del catálogo, sin embargo, para el estado de daño severo, se observa una leve minoría para el set de terremotos.

En segundo lugar, en la Figura 7.8 se muestran las curvas de fragilidad para los 25 registros seleccionados desde el catálogo de Jorquera compatibilizados al espectro de la Norma y al espectro con dos peaks, considerando dos tipos de suelos, de manera de realizar una comparación teniendo un suelo típico de la Región Metropolitana (suelo tipo B), y otro suelo que exija una alta demanda sísmica (suelo tipo E).

Al efectuar una comparación de las curvas de fragilidad a partir de registros reales y registros compatibilizados, es posible ver desde las Figuras 7.7 y 7.8, que la mayor probabilidad de daño se observa para las curvas generadas a partir de los registros compatibilizados a ambos espectros para el suelo tipo E. Sin embargo, al comparar las curvas de la Figura 7.7 y 7.8 (a) y (c), es posible apreciar que existe probabilidad de daño para las curvas de Jorquera, considerando el estado de daño severo (zona por debajo de curva azul), mientras que para las curvas realizadas a través de registros compatibilizados al espectro de la norma y dos peaks para suelo tipo B, no se observa dicho estado de daño. Para la zona que define la probabilidad de que exista daño moderado (zona entre curva roja y azul), se observa de la Figura 7.8 (c), que para el espectro con dos peaks no existe probabilidad de excedencia, mientras que para las Figuras 7.7 y 7.8 (a), la probabilidad de daño para altos niveles de PGA, es mayor para los registros compatibilizados a la norma, y para niveles de PGA menores, la probabilidad de daño es mayor para las curvas de Jorquera. Por último, para la zona que define la probabilidad de que exista daño ligero (zona entre la curva de color negro y rojo), se aprecia desde las Figuras 7.7 y 7.8 (a) y (c), que existe mayor probabilidad de daño para las curvas generadas a partir de los registros compatibilizados al espectro de la norma y dos peaks, para niveles de PGA mayores a 0.4g.

Finalmente, luego de realizar la comparación entre las curvas para registros reales y registros compatibilizados, es posible notar la gran diferencia entre ellas, lo cual se puede explicar principalmente por la cantidad de registros seleccionados y los niveles de PGA utilizados para la generación de las curvas de fragilidad. Otro factor que se debe tener en cuenta, es que los registros seleccionados del catálogo de terremotos de Jorquera, fueron escogidos para diferentes niveles de PGA, de manera de abarcar un amplio rango de registros desde dicho catálogo. En la Tabla 7.2 se muestran los registros seleccionados ordenados desde la menor aceleración máxima del suelo hasta la mayor. A partir de dicha tabla, es posible observar que la mayoría de los registros seleccionados tienen un PGA superior a 0.3g, los cuales en general tienen un alto potencial destructivo, lo que en definitiva afecta en las propiedades de los registros compatibilizados, y por lo tanto, influye en la generación de las curvas de fragilidad.

Tabla 7.2: Registros seleccionados de catálogo de terremotos Jorquera (2014).

Registro Base	Canal	Evento	Estación	PGA [g]	PD [cm*s]
1	1	0604091	ALTO HOSPICIO	0.0545	0.0089
142	1	VALPARAÍSO 1985	CONSTITUCIÓN 85	0.0808	0.8439
9	1	TOCOPILLA 2007	ANTOFAGASTA UCN	0.1280	0.2289
12	3	0510171	ARICA	0.1574	0.0259
69	1	0712161	MEJILLONES CENTRAL	0.1839	0.3389
15	1	TARAPACÁ 2005	ARICA CEMENTERIO	0.2015	0.3291
120	1	MAULE 2010	VALPARAÍSO ALMENDRAL	0.2257	9.8728
183	1	TOCOPILLA 2007	PB08	0.3083	2.6196
166	1	8111071	PAPUDO	0.3574	0.9781
165	1	8111071	LA LIGUA	0.3808	1.4052
27	1	MAULE 2010	CONCEPCIÓN	0.4083	51.0885
151	2	VALPARAÍSO 1985	RAPEL	0.4662	1.1626
132	2	VALPARAÍSO 1985	LLAYLLAY	0.4733	12.2128
111	1	TOCOPILLA 2007	TOCOPILLA	0.5291	3.2275
180	2	TOCOPILLA 2007	PB05	0.5509	1.2260
62	3	MAULE 2010	LLOLLEO	0.5611	18.3306
203	1	MAULE 2010	MELIPILLA	0.5739	5.0203
209	1	MAULE 2010	CONCEPCIÓN SAN PEDRO	0.6066	14.5790
84	2	0809101	PICA	0.6169	0.9637
28	3	MAULE 2010	CONSTITUCIÓN	0.6447	66.8922
135	2	VALPARAÍSO 1985	SAN ISIDRO	0.7034	30.2372
8	1	MAULE 2010	ANGOL	0.7220	18.7445
135	1	VALPARAÍSO 1985	SAN ISIDRO	0.7224	26.1248
203	2	MAULE 2010	MELIPILLA	0.7834	7.3740
8	2	MAULE 2010	ANGOL	0.9406	21.4024

## 7.5. ESTIMACIÓN DE CURVAS DE FRAGILIDAD

Considerando los resultados anteriores, es posible estimar curvas a partir de las curvas de fragilidad obtenidas en puntos anteriores mediante una función de distribución lognormal, la cual corresponde a la función de distribución que mejor se ajusta a los datos. Dicha función se puede expresar como:

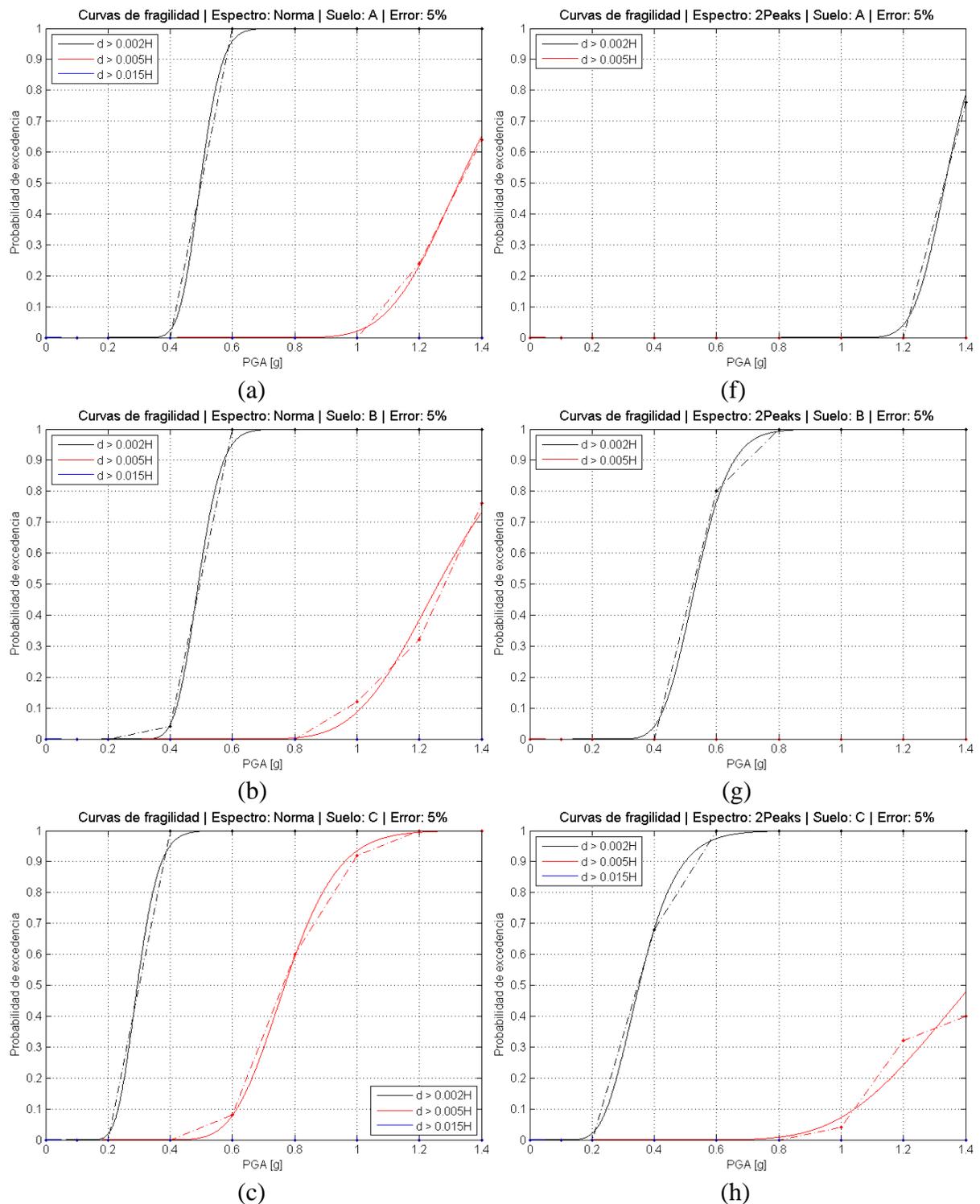
$$F = \Phi \left[ \frac{1}{\sigma_{PS}} \ln \left( PS / \overline{PS} \right) \right] \quad (7.4)$$

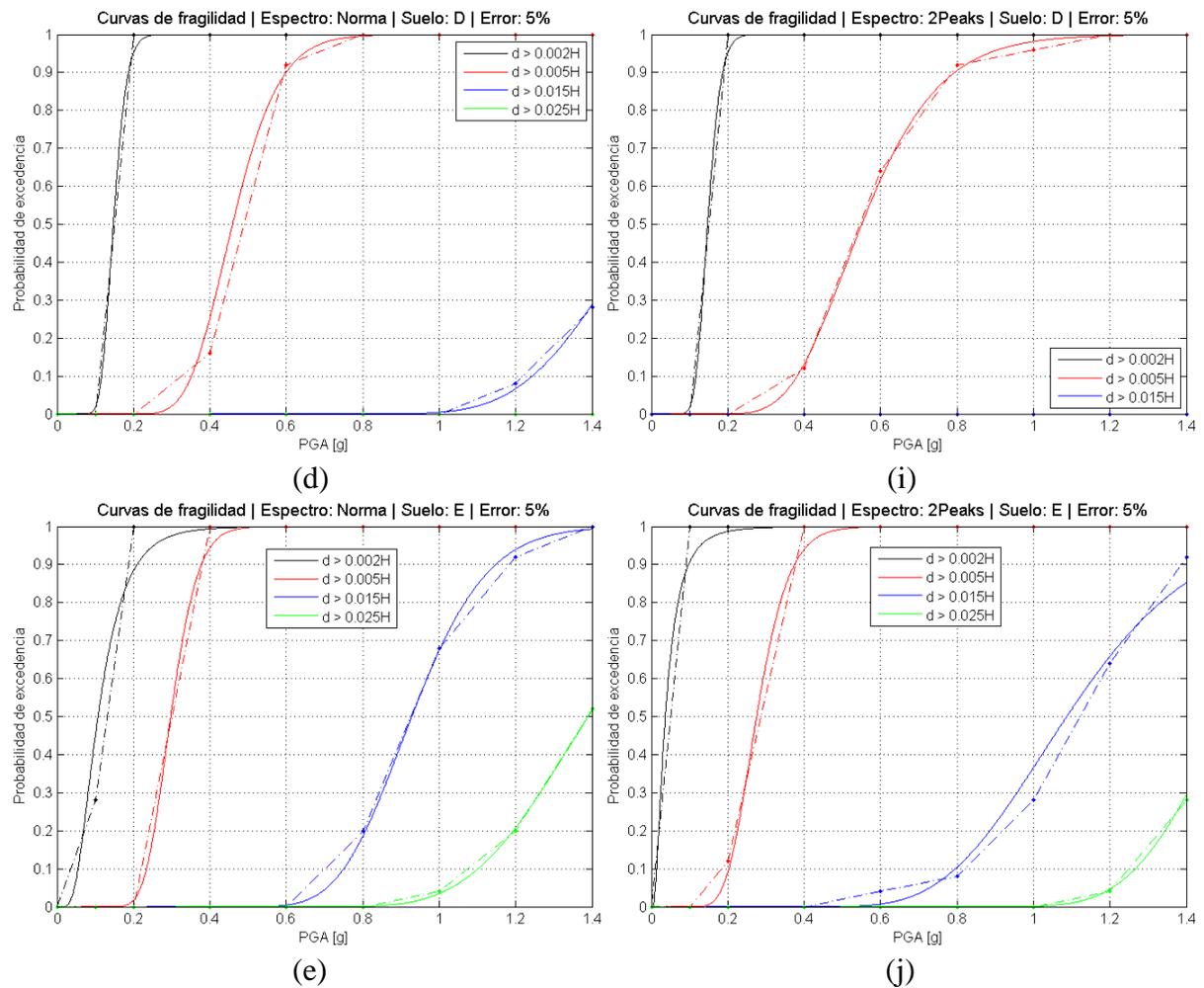
Donde:

$\sigma_{PS}$  : Desviación estándar del logaritmo natural del Parámetro Sísmico.

$\overline{PS}$  : Valor medio del Parámetro Sísmico.

La Figura 7.9 muestra la estimación de las curvas realizadas para la Figura 7.3, la cual representa las curvas obtenidas para los registros compatibilizados al espectro de la Norma Chilena NCh 433 Of. 96 y al espectro con dos Peaks para todos los tipos de suelos, considerando un error de un 5%. El ajuste se realiza de buena manera para los diferentes estados de daño que se obtuvieron para dichas curvas, usando el método de “Maximum Likelihood Estimation”.





**Figura 7.9:** Estimación curvas de fragilidad para el espectro de la Norma y dos Peaks, para cada tipo de Suelo de la Norma NCh433, considerando un 5% de error.

Durante el terremoto magnitud Mw 8.8 ocurrido el 27 de febrero de 2010 en Chile, el edificio de 15 pisos de hormigón armado “Alto Río” ubicado en el centro de Concepción colapsó, debido principalmente a una serie de errores de diseño de estructura y construcción, así como también la incorrecta clasificación del tipo de suelo de fundación. Un registro se obtuvo a pocas cuadras de donde colapsó dicho edificio (registro base 27, Canal 1, estación Concepción, en Tabla 7.2), el cual tiene un PGA de 0.4g aproximadamente. Desde la Figura 7.9 (e) y (j), la cual representa los estados de daños para un suelo tipo E, es posible observar que para un PGA de 0.4g, se tiene una alta probabilidad de daño moderado, es decir, ocurren daños estructurales y no estructurales moderados en el contenido de la estructura, además se reduce su rigidez y capacidad de resistir cargas laterales. A pesar de que para dicha Figura, se obtiene un estado de daño de colapso para niveles de PGA más altos (mayor a 1g aproximadamente), se puede ver la influencia del tipo de suelo en la respuesta no lineal del modelo estructural analizado en el capítulo anterior.

En las Tablas 7.3 y 7.4 se presentan los valores de varianza ( $\sigma_{PS}^2$ ) y valor medio ( $\overline{PS}$ ) obtenidos al realizar las curvas de fragilidad definitivas mediante la función de distribución Log-

Normal ( $F$ ) presentada anteriormente en la ecuación (7.4), tanto para el espectro de la Norma como para el espectro con dos Peaks.

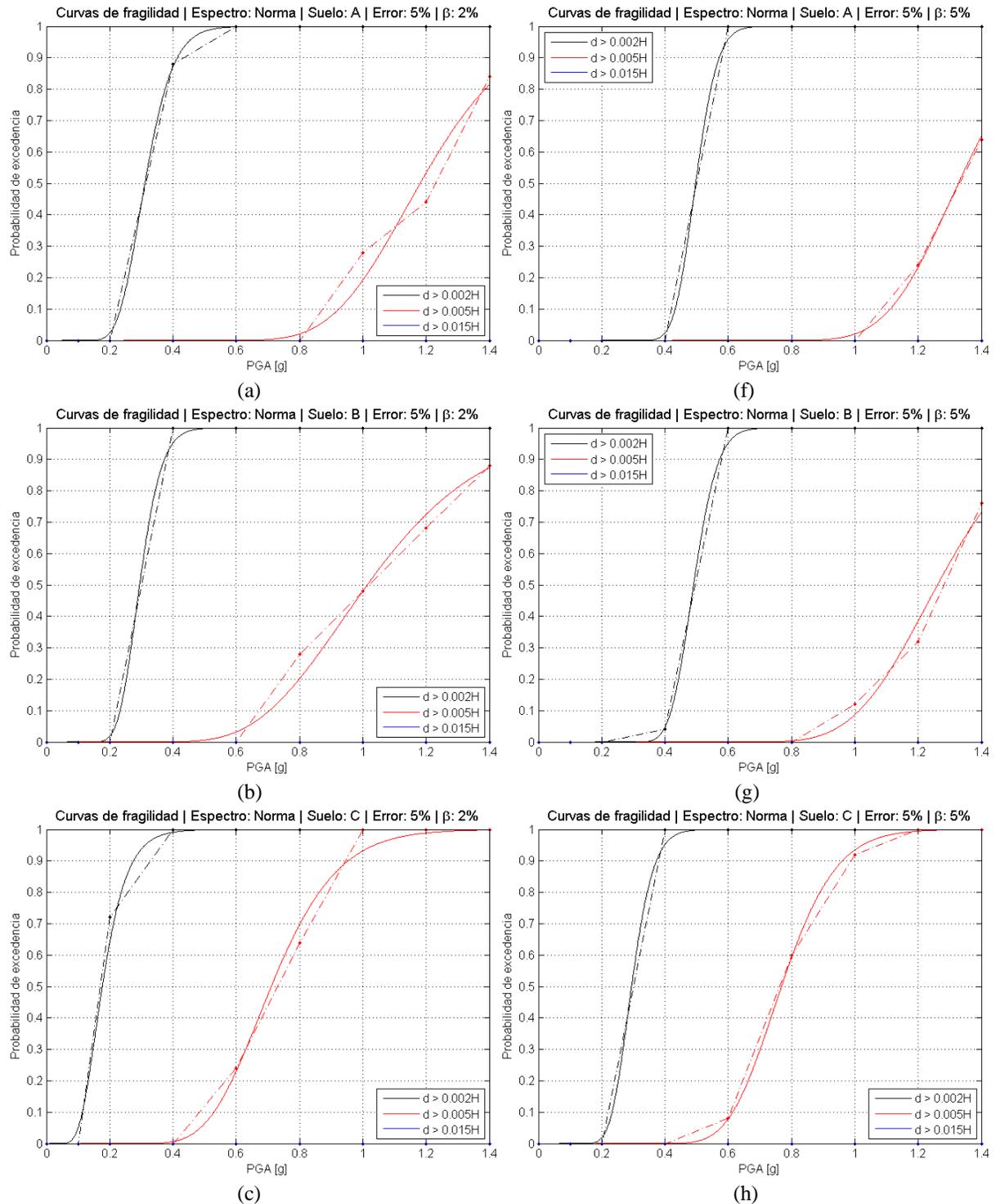
Tabla 7.3: Valores de varianza y valor medio obtenidos para las curvas de fragilidad a partir del espectro de la Norma.

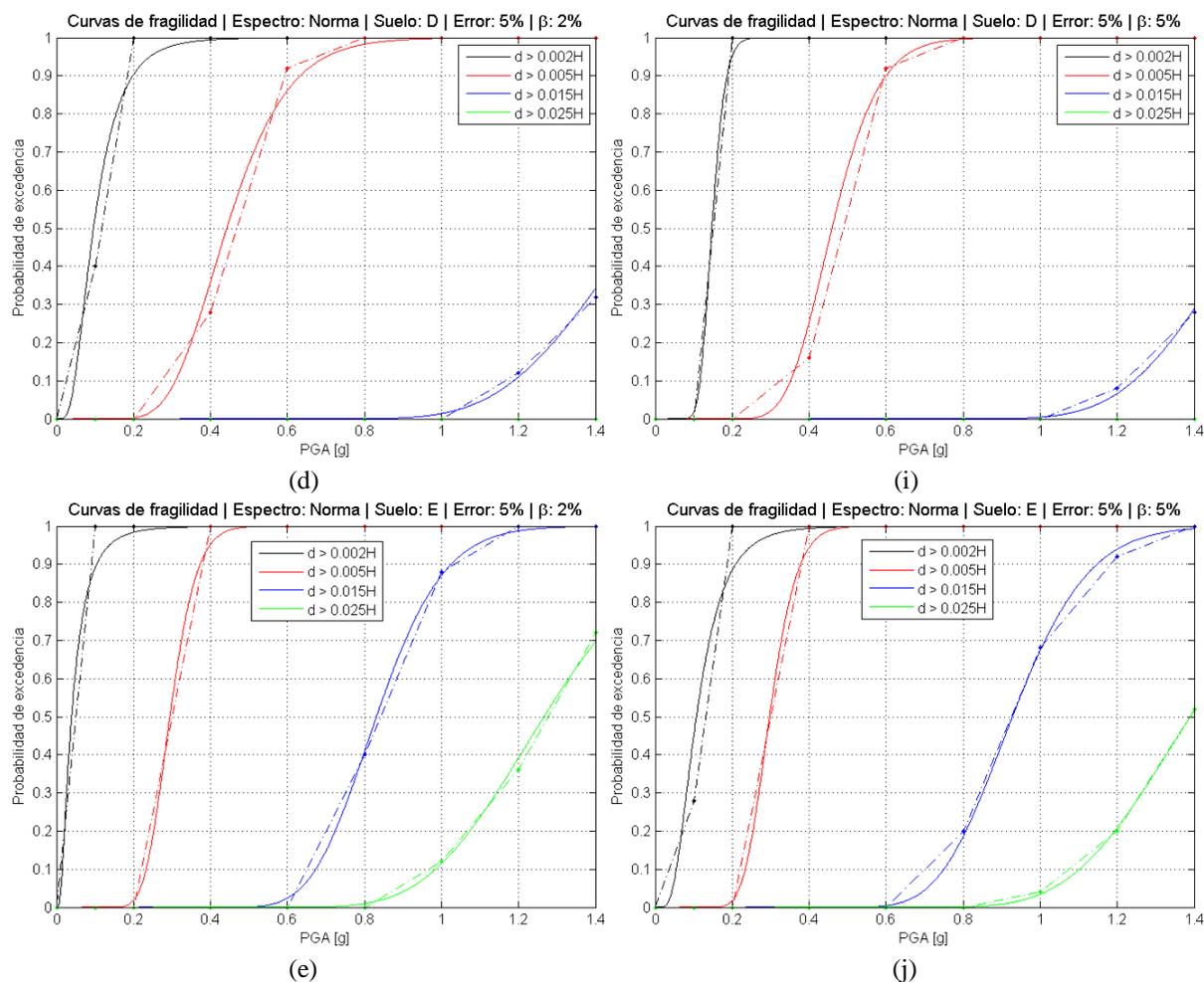
		Distribución Log-Normal (Norma)			
		d>0.002H	d>0.005H	d>0.015H	d>0.025H
Suelo A	$\sigma_{PS}^2$	0.0030	0.0347	-	-
	$\overline{PS}$	0.4996	1.3400	-	-
Suelo B	$\sigma_{PS}^2$	0.0036	0.0481	-	-
	$\overline{PS}$	0.4937	1.2794	-	-
Suelo C	$\sigma_{PS}^2$	0.0031	0.0189	-	-
	$\overline{PS}$	0.2994	0.7798	-	-
Suelo D	$\sigma_{PS}^2$	0.0008	0.0097	0.0646	-
	$\overline{PS}$	0.1497	0.4689	1.5527	-
Suelo E	$\sigma_{PS}^2$	0.0047	0.0033	0.0248	0.0662
	$\overline{PS}$	0.1226	0.3022	0.9408	1.4125

Tabla 7.4: Valores de varianza y valor medio obtenidos para las curvas de fragilidad a partir del espectro con 2 Peaks.

		Distribución Log-Normal (2Peaks)			
		d>0.002H	d>0.005H	d>0.015H	d>0.025H
Suelo A	$\sigma_{PS}^2$	0.0066	-	-	-
	$\overline{PS}$	1.3367	-	-	-
Suelo B	$\sigma_{PS}^2$	0.0080	-	-	-
	$\overline{PS}$	0.5396	-	-	-
Suelo C	$\sigma_{PS}^2$	0.0104	0.1260	-	-
	$\overline{PS}$	0.3643	1.4606	-	-
Suelo D	$\sigma_{PS}^2$	0.0008	0.0281	-	-
	$\overline{PS}$	0.1497	0.5735	-	-
Suelo E	$\sigma_{PS}^2$	0.0019	0.0048	0.0760	0.0422
	$\overline{PS}$	0.0489	0.2834	1.1190	1.5191

Finalmente en la Figura 7.10 se muestra la estimación de las curvas de fragilidad generadas en la Figura 7.5, es decir, considerando una razón de amortiguamiento de 2% y 5%, el espectro de la Norma para todos los tipos de suelos, y un 5% de error, de manera de poder realizar una comparación entre dichas curvas. En la Tabla 7.5 se presentan los valores de varianza ( $\sigma_{PS}^2$ ) y valor medio ( $\overline{PS}$ ) obtenidos al realizar dicha estimación de las curvas.





**Figura 7.10:** Estimación de Curvas de Fragilidad para los registros compatibilizados al espectro de la Norma para cada tipo de Suelo, utilizando varios niveles de PGA considerando una razón de amortiguamiento de 2% y 5%.

Tabla 7.5: Valores de varianza y valor medio obtenidos para 2% de amortiguamiento.

		Distribución Log-Normal (Norma 2%)			
		$d > 0.002H$	$d > 0.005H$	$d > 0.015H$	$d > 0.025H$
Suelo A	$\sigma_{PS}^2$	0.0051	0.0536	-	-
	$\overline{PS}$	0.3186	1.2025	-	-
Suelo B	$\sigma_{PS}^2$	0.0031	0.0930	-	-
	$\overline{PS}$	0.2994	1.0553	-	-
Suelo C	$\sigma_{PS}^2$	0.0045	0.0289	-	-
	$\overline{PS}$	0.1873	0.7294	-	-
Suelo D	$\sigma_{PS}^2$	0.0048	0.0173	0.0846	-
	$\overline{PS}$	0.1126	0.4599	1.5376	-
Suelo E	$\sigma_{PS}^2$	0.0022	0.0031	0.0194	0.0651
	$\overline{PS}$	0.0524	0.2994	0.8422	1.2904

# CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES

## 8.1. RESUMEN

Para la realización del presente trabajo de memoria de título se desarrollaron tres objetivos fundamentales. El primer objetivo se basó en el estudio y la implementación en el software Matlab del programa de compatibilización espectral realizado por Al Atik y Abrahamson (2010). El segundo objetivo, consistió en la realización de una base de datos de registros compatibilizados a un espectro específico, para finalmente realizar el tercer objetivo, el cual correspondió a la generación de curvas de fragilidad a partir de dicha base de datos.

En primer lugar, se realizó un estudio del proceso y el programa de compatibilización espectral realizado por Al Atik y Abrahamson (2010), basado en un método en el dominio del tiempo que adiciona wavelets al registro de aceleración original en estudio, para posteriormente modificarlo de tal manera que su espectro de respuesta de aceleración sea compatible con un espectro objetivo o de diseño. El programa de compatibilización espectral fue implementado en el software Matlab, de manera de realizar la programación de manera más sencilla para realizar los cálculos posteriores de este trabajo. El nuevo programa implementado, tiene similares características al programa original, sin embargo, en este trabajo se utilizó el método de Nigam y Jennings (1969) para calcular los espectros de respuesta de manera más rápida, en desmedro del método de Newmark, el cual utiliza el programa original. Para verificar la diferencia de resultados de la compatibilización espectral mediante el programa implementado en Matlab y el realizado por Al Atik y Abrahamson (2010), se realizaron diversos estudios con diferentes registros chilenos para realizar una comparación de parámetros sísmicos de los registros compatibilizados al espectro de la Norma Chilena NCh433 of. 96 (NCh433) mediante ambos programas. Luego de hacer los análisis y estudios respectivos para comparar los resultados obtenidos por ambos programas, se comienza finalmente a trabajar con el programa implementado en Matlab, con el cual se realizan estudios más exhaustivos, tomando en consideración dos espectros objetivos para poder hacer la compatibilización espectral y efectuar una comparación resultados; el espectro de diseño de la Norma NCh433 y el espectro con dos Peaks de Ruiz y Saragoni (2008).

Después de efectuar diversos estudios mediante el programa de compatibilización implementado en Matlab, se seleccionaron 25 registros de aceleración a partir del catálogo de terremotos de Jorquera (2014), mediante los cuales se hizo una base de datos de registros compatibilizados al espectro de la Norma Chilena NCh433 y al espectro con dos Peaks de Ruiz y Saragoni (2008), para los tipos de suelos de la Norma utilizando diferentes niveles de PGA, de manera de acceder en forma rápida y eficaz a los siguientes parámetros utilizados durante el trabajo: PGA, PGV, PGD, Intensidad de Arias, Intensidad de Housner y Potencial Destructivo. Para realizar la compatibilización se utilizó un margen de error entre el espectro del registro

compatibilizado y el Target de un 5% y 20%, para observar cuanta distorsión ocasionaba el proceso de compatibilización en el registro inicial. Luego de realizar la base de datos, se graficó en escala logarítmica el Potencial Destructivo en función del PGA de los registros compatibilizados y los registros del catálogo de terremotos de Jorquera de manera de poder visualizar la dispersión de los datos y tener una comparación con la tendencia de los terremotos chilenos.

Finalmente se generaron curvas de fragilidad para la base de datos de registros compatibilizados, mediante la obtención de la respuesta a través de un análisis no lineal de un oscilador de un grado de libertad, el cual fue considerado como el modelo estructural simplificado para el primer modo de un edificio de muros para uso habitacional. Dicha estructura fue escogida de manera de representar los principales edificios chilenos de hormigón armado que se vieron dañados sustancialmente en la Región Metropolitana por el terremoto del Maule el 27 Febrero de 2010.

## **8.2. CONCLUSIONES**

### **8.2.1. Comparación de resultados mediante programas en RspMatch y Matlab**

Uno de los principales objetivos de este trabajo fue la implementación del programa de compatibilización espectral en el software Matlab, a través del cual se hicieron diferentes estudios y comparaciones con el programa original RspMatch. La principal comparación de resultados se realizó por medio de parámetros sísmicos tales como PGA, Intensidad de Arias, Intensidad de Housner y Potencial Destructivo de registros de terremotos ocurridos en Chile compatibilizados al espectro de la Norma Chilena NCh433. Al haber realizado la compatibilización y comparación mediante ambos programas, utilizando las mismas características, inputs, Targets y funciones, se llegó a la conclusión que si bien los resultados no fueron idénticamente iguales y los espectros de los registros compatibilizados utilizando los dos programas no se superpusieron completamente, si se obtuvieron resultados similares de los parámetros sísmicos para los registros compatibilizados mediante distintas configuraciones, modificaciones y cambios en el input del programa de compatibilización implementado en Matlab, comparado con los resultados del programa original.

Los espectros de los registros compatibilizados al realizar la compatibilización espectral mediante el programa de Al Atik y Abrahamson (2010) y el implementado en Matlab fueron similares, de tal forma de parecerse lo más posible al Target, por lo tanto, el desajuste espectral promedio al utilizar ambos programas tuvieron bajos valores porcentuales. Sin embargo, a pesar de que los parámetros sísmicos y los espectros de los registros compatibilizados fueron similares, no fueron idénticos. El programa implementado en Matlab fue programado con las mismas funciones y características del programa original, pero la diferencia de resultados que se tuvo, yace principalmente en errores numéricos en la precisión de los cálculos y diferentes cifras

significativas que se obtienen al momento de realizar la compatibilización espectral al utilizar ambos programas.

Luego de ver que los resultados obtenidos mediante RspMatch y Matlab tuvieron características similares, se utilizó el método de Nigam y Jennings (1969) para realizar el cálculo de los espectros de respuesta de manera más rápida, en desmedro del método de Newmark que utiliza el programa original, el cual tomaba un mayor tiempo de ejecución del programa. Al utilizar el nuevo método para calcular los espectros de respuesta y realizar nuevos estudios, se observó que la variación de resultados fue mínima y se adoptó por utilizar dicho método para lograr una disminución del tiempo de ejecución del programa.

### **8.2.2. Análisis de resultados obtenidos mediante estudios preliminares del programa**

Uno de los estudios preliminares que se realizaron con el programa de compatibilización espectral implementado en Matlab, fueron las ampliaciones de registros compatibilizados al espectro con dos Peaks y de la Norma NCh433 para un suelo tipo B, de manera de observar el comportamiento de los registros compatibilizados considerando distintos niveles de PGA, y distintas variaciones y modificaciones al programa para poder efectuar la compatibilización. Las conclusiones principales que se obtuvieron a partir de los parámetros analizados de los registros compatibilizados fueron las siguientes:

- Al aumentar los niveles de PGA de los registros compatibilizados, es decir, utilizando registros compatibilizados a Targets con diferentes aceleraciones máximas del suelo, se observó que los parámetros de dichos registros tales como PGA, Intensidad de Arias, Intensidad de Housner y Potencial Destructivo, también aumentaron sus valores a medida que el espectro utilizado como Target iba creciendo. Este era un resultado esperado, ya que estos parámetros describen la destructividad del terremoto y al modificar un registro para que su espectro sea más grande o más pequeño que el original, se alteran las propiedades de éste, por lo tanto, la variación y distribución de las series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento del registro compatibilizado también aumentan o disminuyen dependiendo del Target que se utilice. En relación con la aceleración, las series de tiempo se vieron mayormente modificadas en zonas donde habían mayores peaks de aceleración, los cuales influían finalmente en el espectro de aceleración compatibilizado al Target, mientras que en sectores donde la aceleración tenía una amplitud menor o similar a la aceleración efectiva, no se observaron mayores variaciones.
- El PGA de los registros compatibilizados no se ajusta fielmente al PGA del Target, ya que en variadas ocasiones se observó que los PGA eran similares, sin embargo, en algunas ocasiones las aceleraciones máximas del suelo de los registros compatibilizados se alejaban bastante de los PGA iniciales con los cuales se amplificaron los espectros utilizados como Target. Las razones de las diferencias de PGA, se deben a varios factores, tales como el rango de frecuencias utilizado como input para realizar la compatibilización

(al utilizar frecuencias más altas, es posible compatibilizar de mejor manera la zona de períodos bajos donde se encuentra el PGA), la diferencia que existe entre el PGA del espectro del registro original y el del Target, además del espaciamiento de frecuencias del Target que se utiliza como input, especialmente para períodos bajos.

- El desajuste espectral entre el espectro del registro compatibilizado y el Target fue menor cuando se utilizó un rango de frecuencias hasta 100 [Hz], mientras que cuando se utilizó un rango hasta 32 [Hz], se obtuvieron errores mayores, sin embargo, los resultados no se vieron alterados mayormente. Una mayor diferencia de resultados se pudo apreciar al realizar la compatibilización utilizando un error de un 5% y 20%, debido que al tener un mayor margen de error, el espectro del registro compatibilizado no se ajusta de la mejor manera al Target, por lo tanto, las propiedades de los registros varían dependiendo del margen de error que se utilice.
- La importancia de escalar el registro al PGA del Target en cada paso de ajuste, radica en una probable disminución del tiempo de ejecución del programa de compatibilización, como también ayuda a realizar la compatibilización espectral cuando el espectro del registro en estudio es sustancialmente diferente al Target al cual se quiere compatibilizar.
- Los parámetros de los registros compatibilizados al espectro con dos Peaks fueron menores que los registros compatibilizados al espectro de la Norma NCh433, a pesar de haber utilizado los mismos registros e inputs en el programa, la única diferencia fue el Target introducido para realizar la compatibilización. Las variaciones de resultados se deben a la diferencia entre ambos espectros utilizados como Targets, ya que el espectro de la Norma está prácticamente en su totalidad por sobre el espectro con dos Peaks para un mismo nivel de PGA.

Posteriores estudios fueron realizados a partir de los registros de Concepción Centro y Concepción San Pedro obtenidos del terremoto del Maule del año 2010, los cuales fueron compatibilizados al espectro de la Norma NCh433 para suelos tipo E y D respectivamente, y al espectro con dos Peaks, de manera que éste último fuera similar al espectro de los registros de Concepción, para así poder comparar los parámetros sísmicos de los registros compatibilizados a ambos espectros. Los niveles de PGA que se utilizaron para los Targets, fueron los PGA de cada registro de Concepción que se estudió (se normalizó el Target al PGA de cada registro de Concepción para posteriormente realizar la compatibilización). A partir de dichos estudios es posible concluir lo siguiente:

- Los parámetros de los registros compatibilizados tales como Intensidad de Arias, Intensidad de Housner y Potencial Destructivo, varían dependiendo de la diferencia entre el espectro utilizado como Target y el espectro del registro original, notándose una mayor variación cuando el Target está por sobre o debajo del espectro original, en la mayoría de sus períodos.

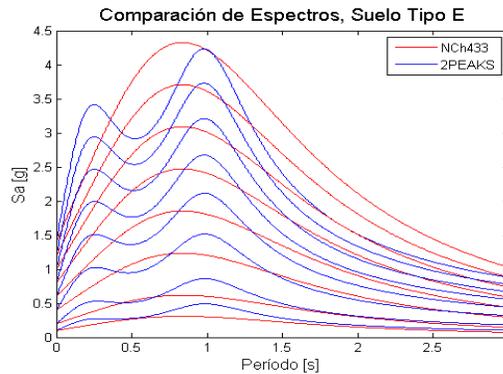
- Los registros compatibilizados al espectro con dos Peaks se vieron menos modificados con respecto a los registros originales, en comparación con los registros compatibilizados al espectro de la Norma, donde se observó que dichos registros presentaron una mayor variación. Esta diferencia de resultados, se debió principalmente a la desigualdad existente entre el espectro del registro original y el Target, ya que el espectro de la norma no considera un segundo peak, y por ende, en ocasiones elimina la energía asociada al peak del espectro original debido a las vibraciones del suelo, por lo tanto, mientras mayor sea el desajuste espectral inicial, el registro se verá forzado a parecerse al Target de mayor manera.

### **8.2.3. Análisis de resultados de base de datos de registros compatibilizados**

El segundo objetivo fundamental de este trabajo, correspondió a la realización y análisis de una base de datos de registros compatibilizados, utilizando como Target, el espectro de la Norma NCh433 y el espectro con dos Peaks, para los tipos de suelos de la Norma y diferentes niveles de PGA y márgenes de error. El estudio de la base de datos se basó principalmente a partir de gráficos en escala logarítmica de Potencial Destructivo en función del PGA de los registros compatibilizados. Entre las conclusiones más importantes se destacan las siguientes:

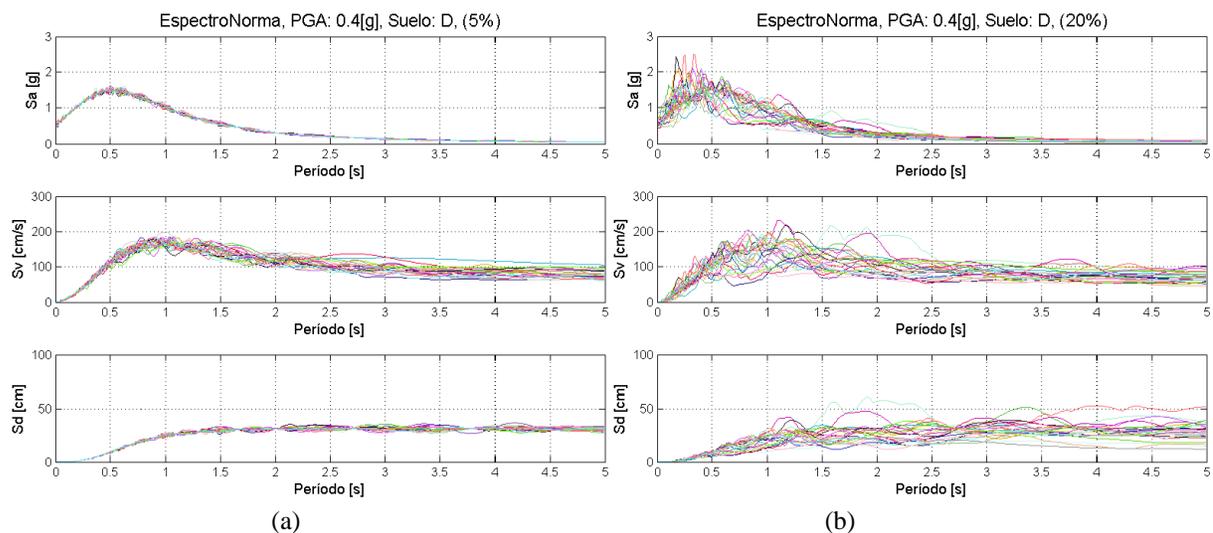
- Al graficar el Potencial Destructivo en función del PGA de los registros compatibilizados de la base de datos y los registros del catálogo de terremotos de Jorquera (2014), se observó que para un mayor margen de error (mayor desajuste espectral), los registros compatibilizados siguieron la tendencia de los terremotos chilenos, mientras que para un margen de error menor, la tendencia de los registros compatibilizados estuvo por sobre la tendencia de terremotos chilenos.
- Al comparar el Potencial Destructivo en función del PGA de los registros compatibilizados de la base de datos, se observó que al pasar por los diferentes tipos de suelos, el Potencial Destructivo de los registros compatibilizados aumentó desde el suelo tipo A hasta el suelo tipo E.
- Cuando fueron seleccionados registros específicos para observar el proceso de compatibilización y la tendencia de registros compatibilizados, se observó que para registros originales que tenían un alto potencial destructivo, sus registros compatibilizados también tenían potenciales destructivos altos, dependiendo del target utilizado, mientras que para registros originales que tenían un potencial destructivo bajo, sus registros compatibilizados también tenían dichos parámetros bajos, en comparación con los registros originales y compatibilizados de potenciales destructivos altos. Para un caso intermedio se tuvo un potencial destructivo intermedio. La tendencia del potencial destructivo en función del PGA de los registros compatibilizados era aproximadamente lineal creciente, es decir, a medida que el PGA de dichos registros aumentaba, el potencial destructivo también aumentaba.

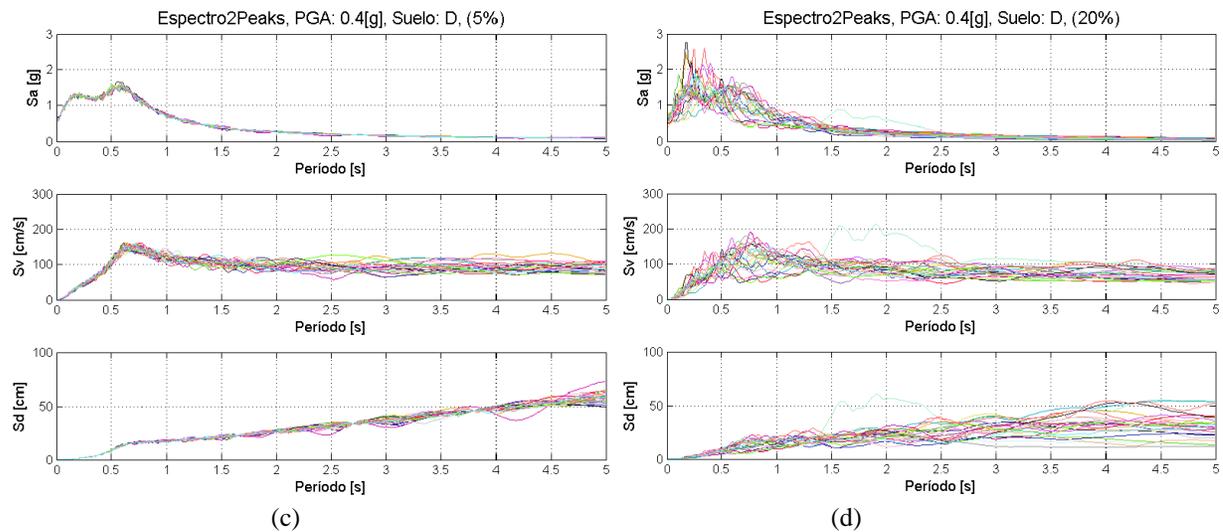
- El potencial destructivo de la base de datos de registros compatibilizados al espectro de la Norma fue mayor en comparación con el espectro con dos Peaks, debido a la diferencia entre ambos espectros, los cuales se pueden visualizar en la Figura 8.1, la cual muestra los espectros generados como Target para el suelo tipo E, donde se observa en la mayoría de los casos que el espectro con dos Peaks (color azul), está casi completamente por debajo del espectro de la Norma (color rojo), lo cual incide directamente en los parámetros sísmicos de los registros compatibilizados.



**Figura 8.1:** Espectros generados para suelo tipo E.

- En la Figura 8.2 es posible ver la tendencia de los espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento de los registros compatibilizados al espectro de la Norma y dos Peaks para un suelo tipo D y utilizando un 5% y 20% de error, los cuales fueron obtenidos desde la base de datos (para 25 registros). Se utilizó la aceleración efectiva máxima de 0.4g de la Norma NCh433, la cual es amplificada por el factor “S” del espectro de dicha Norma por el tipo de suelo, observándose un PGA aproximadamente de 0.48g en los espectros de aceleración de la Figura 8.2 (a), y (c). Al utilizar un margen de error de un 20% es posible ver que la tendencia de los espectros es similar, sin embargo, para un margen de error de un 5%, los espectros de respuesta de los registros se superponen de buena manera, notándose una tendencia clara.





**Figura 8.2:** Espectros de Respuesta de registros compatibilizados para suelo tipo D y un margen de error de 5% y 20%, utilizando la aceleración efectiva máxima de la Norma  $A_0=0.4g$ .

#### 8.2.4. Análisis de Curvas de Fragilidad

Las curvas de fragilidad fueron generadas a partir de la respuesta no lineal del modelo estructural simplificado estudiado en este trabajo, utilizando los registros compatibilizados de la base de datos. Dichas curvas se generaron determinando para cada nivel de PGA la cantidad de respuesta de desplazamiento que cumplieron las condiciones límites de estados de daño tales como “No Daño”, “Daño Ligero”, “Daño Moderado”, “Daño Severo” y “Colapso”. A partir de los resultados obtenidos es posible realizar las siguientes conclusiones:

- Pasando por los distintos tipos de suelos desde el suelo tipo A hasta el suelo tipo E, se observó que a medida que el suelo exigía mayor demanda sísmica, la probabilidad de daño del modelo estructural también aumentaba. Para el suelo tipo E fue donde se evidenciaron probabilidades de daño más altas, observándose el estado de daño “Colapso”.
- A partir de las curvas se observó en general una mayor probabilidad de daño para los resultados obtenidos utilizando el espectro de la Norma NCh433, en comparación con los resultados a partir del espectro con dos Peaks. Al comparar la probabilidad de daño de las curvas y el potencial destructivo de los registros compatibilizados a los dos espectros utilizados como Target, se encontró una relación debido a que en ambos casos dieron resultados mayores para el espectro de la Norma, por lo tanto, existe una relación entre la respuesta obtenida para el modelo estructural y el potencial destructivo de los registros compatibilizados. En conclusión se tiene que si el potencial destructivo de un registro es alto, la respuesta de una estructura sometida a dicho registro también será alta, mientras que si el potencial destructivo de un registro es bajo, la respuesta de una estructura sometida a dicho registro también será baja. Por lo tanto, al realizar la compatibilización

espectral se debe tener en cuenta el registro inicial con el cual se trabaja, debido a que inicialmente éste puede tener una destructividad alta y puede dañar más un edificio en comparación con un registro inicial que tiene una destructividad baja, el cual no puede ocasionar daño alguno a la estructura en estudio.

- Cuando se realizó la comparación de las curvas de fragilidad considerando una razón de amortiguamiento de 2% y 5% para el modelo estructural, teniendo en cuenta los registros compatibilizados al espectro de la norma chilena para todos los tipos de suelos (5% de error con respecto a Target), como era de esperarse, se observó una mayor probabilidad de daño para el caso con menor amortiguamiento en la mayoría de los casos, sin embargo para suelos que exigen mayor demanda sísmica, tales como los suelos tipo D y E, la variación fue menor, por lo tanto, a partir de lo anterior se desprende que para suelos que exigen mayor demanda sísmica, el amortiguamiento no influye sustancialmente en la respuesta de la estructura. Es importante mencionar que para las curvas de fragilidad generadas para una razón de amortiguamiento de 2%, se utilizaron los registros compatibilizados al Target respectivo, considerando un 5% de amortiguamiento, debido a la dificultad de volver a realizar registros compatibles con un espectro para un 2% de amortiguamiento, a causa de la gran cantidad de tiempo de ejecución del programa de compatibilización implementado en Matlab.
- Al comparar las curvas obtenidas por Jorquera (2014) y las curvas a partir de registros compatibilizados, se observó una mayor probabilidad de daño para los registros compatibilizados al espectro de la Norma NCh433 para los suelos tipo C, D y E, así como también para los registros compatibilizados al espectro con dos peaks para el suelo tipo E, en comparación con las curvas de Jorquera, considerando los diferentes estados de daño. La diferencia entre las curvas realizadas para registros reales escalados y registros compatibilizados, se asocia principalmente a la cantidad de registros seleccionados y los niveles de PGA que se utilizaron para generar las curvas de fragilidad.

### **8.3. LIMITACIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

#### **8.3.1. Limitaciones del Trabajo**

Dentro de las limitantes que se pueden mencionar, estuvo el tiempo de ejecución del programa de compatibilización espectral implementado en Matlab, ya que dependiendo de factores tales como el largo del registro inicial, el número de frecuencias utilizadas en el Target y el cálculo de los espectros de respuesta, el programa podía reducir o aumentar significativamente el tiempo en realizar la compatibilización. Por lo tanto, debido a la limitante del tiempo, no se pudo realizar la compatibilización para todo el catálogo de Jorquera (2014) y sólo fueron seleccionados 25 registros representativos. Una posible solución con respecto a esta limitante, es el remuestrear el registro, de manera de reducir su frecuencia de muestreo y por lo tanto así

disminuir el número de puntos que tiene el registro, lo que lleva a reducir el tiempo de ejecución del programa. Un ejemplo para observar el tiempo de ejecución del programa utilizando resample se presenta en anexos (ANEXO F). A pesar de que los resultados no fueron idénticos para los registros compatibilizados originales y los remuestreados, si se observó una gran similitud al realizar distintas pruebas de los resultados.

Al realizar el proceso de compatibilización, el registro se puede ver modificado sustancialmente si el espectro del registro original es completamente diferente al espectro utilizado como Target, así como también al realizar la compatibilización se puede eliminar una onda justamente importante del registro, por lo tanto, las propiedades del registro compatibilizado podrían ser muy diferentes en relación con el registro original, lo que puede alterar los resultados de un estudio como en el caso de un análisis no lineal de una estructura.

Otra limitante a considerar es el espectro elegido como Target, debido a que los registros compatibilizados dependiendo del tipo de Target, pueden cambiar sustancialmente, como también sus parámetros sísmicos y sus características en general. Además, las frecuencias utilizadas para generar el Target en forma discreta, también influyen en la compatibilización, debido que al utilizar una gran cantidad de puntos, la compatibilización se realiza de mejor forma, sin embargo, esto exige una mayor demanda de tiempo de ejecución del programa, por lo tanto se debe escoger un espaciamiento adecuado para generar el Target.

### **8.3.2. Trabajos Futuros**

Se recomienda en futuras investigaciones, realizar un análisis no lineal a un edificio estándar en Chile, de manera de someterlo a un registro, y efectuar una comparación con el mismo registro pero compatibilizado a un espectro específico, para así poder observar la capacidad de la estructura al utilizar ambos registros.

También sería importante realizar la compatibilización para todos los registros del catálogo de Jorquera (2014), de manera de poder generar curvas de fragilidad con una mayor cantidad de datos y así obtener mejores resultados.

En cuanto al remuestreo de registros, sería relevante realizar un análisis y comparación de registros compatibilizados a partir de registros con y sin resample de manera de observar cuanta distorsión ocasiona el remuestrear un registro, y como varían las propiedades de sus registros compatibilizados.

Un cambio que podría llevarse a cabo en el programa de compatibilización espectral implementado en Matlab, es el cambiar la wavelet propuesta por Al Atik y Abrahamson (2010), por una función que represente de mejor manera las ondas sísmicas observadas en Chile.

# BIBLIOGRAFÍA

1. Abrahamson, N. A., (1992). “*Non-stationary spectral matching*”, *Seismological Research Letters*, 63(1), 30.
2. Al Atik, L. y Abrahamson, N. A., (2010) “*An Improved Method for Non-stationary Spectral Matching*”, *Earthquake Spectra*, Vol. 26, No. 3, pp. 601-617.
3. Araya. R. y Saragoni R., (1984). “*Earthquake Accelerogram Destructiveness Potential Factor*”. 8th World Conference on Earthquake Engineering. San Francisco, U.S.A.
4. Arias, A., (1970). “*Measure of Earthquake Intensity*”, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.
5. Barbat, A. H., (1998): “*El riesgo Sísmico en el Diseño de Edificios*”, Calidad Siderúrgica, Cuadernos Técnicos, 4, Madrid.
6. Centro sismológico nacional. Universidad de Chile. Sismos Importantes y/o Destructivos (1570 a la fecha). [En línea]. <<http://www.sismologia.cl/>>.
7. Droguett, A., (2008). “*Análisis comparativo de vulnerabilidad y costo entre edificios de marcos y muros con una misma superficie en planta*”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago.
8. Guendelman, T., Guendelman, M., Lindenberg, J. Leyton, F. y Einsenberg, A., (1997). “*Desempeño sísmico implícito de edificios diseñados con la norma sísmica chilena*”, VII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, La Serena.
9. Hancock, J., Watson-Lamprey, J., Abrahamson, N. A., Bommer, J. J., Markatis, A., McCoy, E. y Mendis, R., (2006). “*An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets*”, *J. of Earthquake Eng.*, 10 (Special Issue 1), 67-89.
10. Housner G.W., (1952). “*Intensity of Ground Motion During Strong Earthquakes*”, *Earthquake Engineering Research Laboratory*, California Inst. Of Technology, Pasadena, California.
11. Instituto Nacional de Normalización, (2003). “*Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica*”. NCh 2745. Of.2003. Modificada en 2009, I.N.N, Santiago.
12. Instituto Nacional de Normalización, (2009). “*Diseño sísmico de edificios*”. NCh 433. Of.1996 más Decreto Supremo N°61 de 2011, I.N.N, Santiago.

13. Jorquera, R., (2014). “*Catálogo de terremotos subductivos chilenos para la generación de curvas de Fragilidad*”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago.
14. Lilhanand, K., y Tseng, W. S., (1988). “*Development and application of realistic earthquake time histories compatible with multiple damping response spectra*”, in *Ninth World Conf. Earth. Engin.*, Tokyo, Japan, Vol. 2, 819–824.
15. Nigam, N., y Jennings, P., (1969). “*Calculation of response spectra from strong-motion earthquake records*”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 59, No. 2, pp. 909-922.
16. Paz, M., (1996). *Dinámica Estructural: Teoría y Cálculo*.
17. Ruiz S. y Saragoni G. R., (2008). “*Two peaks response spectra (2PRS) for subduction earthquakes considering soil and source effects*”. 14th World Conference on Earthquake Engineering. China.
18. Ruiz S. y Saragoni G. R., (2012). “*Implicaciones y nuevos desafíos de diseño sísmico de los acelerogramas del terremoto del 2010*”, Mw=8.8 Terremoto en Chile, 27 de febrero 2010, pp 127-146.
19. Saavedra, M., (2005). “*Análisis de edificios con aisladores sísmicos mediante procedimientos simplificados*”. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil en Obras Civiles. Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, Valdivia.
20. Saragoni, G. R., (1993). “*Estudio comparativo de la capacidad destructiva de los terremotos de Chile y México de 1985*”, Memorias del VIII Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sísmorresistente y Primeras Jornadas Andinas de Ingeniería Estructural, Venezuela.
21. Saragoni, G. R., Holmberg, A y Saéz, A., (1989). *Potencial Destructivo y destructividad del terremoto de Chile de 1985. 5as Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Estructural. Santiago, Chile. Vol. 1, pp. 369-378.*
22. SEAOC., (1995). *Vision 2000: Performance Based Seismic Engineering of Buildings*, San Francisco.
23. Trifunac, M. D. y Brady, A. G., (1975). “*On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion*”. *BSSA*, Vol. 65, pp. 139-162.
24. Vampa, V., (2011). “*Desarrollo de herramientas basadas en la transformada wavelet para su aplicación en la resolución numérica de ecuaciones diferenciales*”. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, La Plata.

# ANEXO A

## A.1. EXPLICACIÓN DEL PROGRAMA DE COMPATIBILIZACIÓN ESPECTRAL

El programa realizado en Matlab, al igual que el programa original, necesita como input un registro de aceleración y un espectro de diseño (Target) al que se quiera realizar la compatibilización espectral.

En primer lugar, se escoge un rango de frecuencias al cual se quiere realizar la compatibilización con respecto al target, por ejemplo, en un principio se puede utilizar un rango entre 1 y 32 [Hz], y luego ir aumentando el rango de frecuencias, hasta lograr una mejor compatibilización del registro al target.

En segundo lugar se calcula el espectro de respuesta de aceleración del registro original y se compara con el target, para poder calcular la diferencia entre espectros (desajuste espectral). Luego el programa comprueba si el desajuste espectral es menor que una tolerancia que se asigna en el input del programa. Si el desajuste espectral es menor que la tolerancia, se pasa a otro rango de frecuencias al que se quiere compatibilizar, en cambio, si el desajuste es mayor, se subdivide el target en subgrupos, donde cada subgrupo contiene un determinado número de frecuencias a lo largo de todo el rango de frecuencias del target en el que esté trabajando el programa.

Al subdividir el target en subgrupos, el programa va trabajando con cada uno de estos, y calcula el espectro de respuesta de aceleración del registro con las frecuencias de ese subgrupo, para luego calcular el desajuste espectral que se tiene con respecto al target en esas frecuencias.

Después de calcular el desajuste espectral para el subgrupo de frecuencias, se calcula la matriz de correlación “ $C$ ” para cada subgrupo. Al calcular la matriz  $C$ , se realiza la descomposición en valores singulares (SVD) de dicha matriz. Posteriormente se calcula el factor de escala lineal para cada wavelet (amplitud de cada wavelet,  $b = C^{-1}\delta R$ ), minimizando el desajuste espectral.

Encontrado el factor de escala de cada wavelet, se procede a escalar y sumar wavelets con el objetivo de crear una función de ajuste que ayude a modificar el registro de aceleración para poder compatibilizarlo al target. Lo que se hace básicamente es lo que representa la ecuación (A.1), en la cual se puede ver que la wavelet con su amplitud, se va sumando por todas las frecuencias del subgrupo, para luego crear la función de ajuste total del subgrupo.

$$\delta a(t) = \sum_{j=1}^N b_j f_j(t) \quad (\text{A.1})$$

Lo anteriormente descrito, se realiza para cada subgrupo. Si no se ha llegado al último subgrupo, se carga el subgrupo siguiente, se calcula el desajuste espectral, y se vuelve a realizar la iteración antes mencionada. Cuando se termina con el último subgrupo, se agrega la función de ajuste total al registro de aceleración para que el registro quede compatibilizado al target.

La función de ajuste, la cual es la suma de las wavelets amplificadas por su factor de escala, realiza el ajuste para poder crear un registro compatible con el target, lo cual se puede observar en la ecuación (A.2), donde el ajuste  $\delta a$  es el que finalmente modifica el registro.

$$a_1(t) = a(t) + \gamma \delta a(t) \quad (\text{A.2})$$

Luego de agregar la función de ajuste total al registro de aceleración, se vuelve a calcular el espectro de respuesta de aceleración del registro ya modificado y se compara con el target y se verifica si el desajuste espectral es menor que la tolerancia que se impuso en el input del programa. Si el desajuste espectral es menor que la tolerancia, se pasa al siguiente rango de frecuencias, si no, se vuelve a subdividir el target en subgrupos y se comienza a iterar nuevamente.

Finalmente, cuando se termina con el último rango de frecuencias para realizar la compatibilización, se guarda el registro compatibilizado al target.

## A.2. MANUAL PARA RSPMATCH14

### INPUT DEL PROGRAMA

El input que necesita el programa es un registro de aceleración, un espectro de diseño (target), y el input que pide el programa en un principio al compilarlo.

El registro de aceleración que se ingresa, debe ser en una columna y en un archivo de texto (.txt) llamado “**registro**” (También sirven los registros que se colocan como input en el programa de RSPMatch original).

El target que se ingresa, debe ser en dos columnas (la primera con la frecuencia en Hz y la segunda con el valor del espectro de diseño asociado a cada frecuencia, partiendo de menor a mayor frecuencia, es decir, partiendo con el mayor periodo) y en un archivo de texto (.txt) llamado “**target**”.

El programa se inicia con el archivo RSPM14, y al compilarlo se ingresan los input del programa en pantalla.

*Como ejemplo de registro se tiene el registro de Concepción Centro longitudinal (período de suelo de 2 segundos) para el Terremoto del 2010. El target que se tiene es el espectro de diseño de la norma NCh 433 con el decreto supremo N° 61, para un suelo E.*

### **Parámetros del programa**

**nb\_runs**: Número de pasos de ajuste (Run). Se utiliza comúnmente un valor de 4 o mayor.

**maxiter**: Máximo número de iteraciones para la compatibilización espectral. Este valor depende de la diferencia entre el espectro del registro de aceleración y el espectro de diseño (target). Típicamente se utiliza un valor de 80 iteraciones en el primer paso de ajuste y 50 iteraciones en los siguientes pasos de ajuste. **El input que requiere el programa es un vector fila con un tamaño igual al valor del número de pasos de ajuste (nb\_runs). Por ejemplo si se utilizan 4 pasos de ajuste, se utiliza un vector fila con 4 componentes [80 50 50 50] (sólo como recomendación este vector), cada componente es el máximo número de iteraciones para la compatibilización espectral.**

**tol**: Tolerancia para el máximo desajuste en fracción del target. El valor utilizado típicamente es de 0.05 para un 5% de desviación máxima con respecto al espectro de diseño.

**gamma**: Convergence damping. Este factor especifica la fracción del ajuste realizado al registro de aceleración en cada iteración. Este parámetro usualmente es 1.

scaleFlag: Este parámetro es necesario si es que se requiere escalar el registro de aceleración y el espectro de respuesta al PGA del registro. Los valores de este parámetro pueden tomar los siguientes valores:

- 0 No se escala
- 1 Escalar el registro de aceleración antes y después de cada iteración
- 2 Escalar el registro de aceleración inicial al punto que se requiera antes de la primera iteración (sólo para cada paso de ajuste).

scalePGA: Este valor es el PGA al que se quiere escalar el registro de aceleración en unidades de g, como por ejemplo un valor de 0.45 si es que se desea escalar a un registro que tenga un PGA de 0.45g.

dtFlag: Factor de interpolación (entero igual o mayor que 1), usado para interpolar el registro de aceleración a  $1/\text{dtFlag}$  del input del paso de tiempo (dt del registro). Este factor usualmente es 1.

evMin: Mínimo valor propio normalizado usado en la descomposición en valores singulares (SVD). El valor recomendado para este parámetro es  $1.0e-4$ .

groupSize: Número de valores espectrales para usar en la compatibilización de un subgrupo (Tamaño del grupo de frecuencia para definir el número de grupos para trabajar). Este valor es usualmente 20.

maxFreq: Máxima frecuencia (Hz) hasta la que se realiza la compatibilización espectral. Este valor es usualmente 45.

freqmatch: Rango de frecuencia para compatibilización espectral (Hz). La compatibilización espectral para un cierto paso es realizado para todas las frecuencias entre el rango de frecuencia escogido. Para periodos bajos del espectro de aceleración son influenciados por periodos largos de las wavelets, por lo tanto se recomienda hacer la compatibilización espectral en múltiples pasos. El primer paso se realiza típicamente para un rango de frecuencias de 1 a 32 Hertz. Los periodos más largos son compatibilizados progresivamente en los pasos siguientes. **El input que requiere el programa es una matriz con un tamaño igual al valor del número de pasos de ajuste (nb\_runs) por 2 (se tienen 2 columnas por el rango de frecuencias). Por ejemplo si se utilizan 4 pasos de ajuste se tiene como ejemplo:**

[1 32; 0.5 32; 0.3 32; 0.2 32]

Donde cada fila es el rango de frecuencias para la compatibilización espectral en cada paso de ajuste.

scale1: Factor de escala usado para escalar el registro de aceleración antes de que comienza la compatibilización espectral. Este valor es usualmente 1.

### **Parámetros del registro**

Fs: Frecuencias de muestreo en muestras/segundos, lo cual depende de cada registro de aceleración, como por ejemplo 200 muestras por segundo.

pad: Este parámetro se utiliza si se requiere realizar padding en el programa, **se utiliza 1 si es que se quiere realizar el padding y se utiliza 2 si no se requiere**. Al realizar el padding, el programa toma un tiempo mayor en completarse. Al realizar el padding en el programa, puede que la serie de tiempo de aceleración final tenga o no tenga padding, esto depende de cada registro, ya que esto se realiza para que las series de tiempo de velocidad y desplazamiento de la wavelet no tengan drift. Al no requerir padding (opción 2), la serie de tiempo de aceleración final no tendrá padding. Comúnmente se utiliza la opción 2 para no modificar sustancialmente el registro.

nAdded: se rellena con ceros al comienzo del registro de aceleración para el padding. Este parámetro es usualmente cero para el registro de aceleración inicial usado en el primer paso de la compatibilización espectral. Si se requiere padding, la serie de tiempo de aceleración generada desde un cierto paso y usado como input en los siguientes pasos, nAdded podría tener un valor no nulo si es que el padding ocurre internamente.

### **Parámetros espectro de diseño (Target)**

Damp: Razón de amortiguamiento para el cálculo de los espectros de respuesta. Si se requiere una razón de amortiguamiento de un 5%, en el programa se debe colocar 0.05 para que los cálculos del programa sean con esta razón de amortiguamiento.

## **OUTPUT DEL PROGRAMA**

En primer lugar, el programa creará una carpeta con los resultados de la compatibilización espectral en cada paso de ajuste, siendo el último paso de ajuste el que tenga el registro de aceleración compatibilizado al espectro de diseño final. La carpeta tiene el nombre “RESULTADOS”, en la cual se crean carpetas con cada paso de ajuste (Run). En cada carpeta de paso de ajuste, se tienen dos archivos:

- “**acc.txt**” que es la aceleración compatibilizada para ese paso de ajuste.
- “**espectro.txt**” el cual contiene 5 columnas: Freq (frecuencia), Target (Espectro de diseño), Computed (Pseudo-espectro de aceleración ya compatibilizado), Initial (Pseudo-

espectro de aceleración inicial del registro de aceleración) y tPeak (Tiempo de la respuesta de aceleración máxima para cada frecuencia).

Los archivos de texto anteriores se tienen que abrir en **WORDPAD**.

En segundo lugar, se genera un archivo de texto “**accSave.txt**”, el cual contiene el registro de aceleración compatibilizado final al espectro de diseño, y se puede abrir con BLOC DE NOTAS O WORDPAD.

Finalmente el programa muestra gráficos de comparación de espectros, comparación de registro real y compatibilizado y comparación de Intensidad de Arias normalizado e imprime en pantalla lo siguiente:

- Desajuste promedio espectral (error promedio).
- PGA registro, registro compatibilizado y target.
- Intensidad de Arias de registro y registro compatibilizado.
- Intensidad de Housner de registro y registro compatibilizado.
- Potencial destructivo de registro y registro compatibilizado.

### A.2.1. Programa RspMatch14

A continuación se presenta el programa implementado en Matlab de compatibilización espectral:

```
clc, clear all, close all
%%      program RSPM14

global MAXPTS MAXPTS_RSP MAX_MATCH MAXGROUP MAXPARAM MAX_FREQ MAX_DAMP

%% Parametros preestablecidos por rspMatch.h
MAXPTS=62000; MAXPTS_RSP=200000; MAX_MATCH=400; MAXGROUP=10;
MAXPARAM=15;  MAX_FREQ=400;      MAX_DAMP=5;

%% INGRESAR DATOS PARA QUE EL PROGRAMA INICIE
fprintf('\nReescribir registro de aceleración en .txt como "registro"\n')
fprintf('Reescribir espectro de diseño en .txt como "target"\n')

% Parámetros programa
fprintf('\nPARÁMETROS PROGRAMA\n')
nb_runs=input('Ingresar máximo N° de Run (eg 4): '); % Pedir numero de Pasos
de ajuste (Run)
maxiter=input('Ingresar máximo N° de iteraciones (eg [80 50 50 50]): '); %
Arreglo de acuerdo al numero de pasos de ajuste
tol=input('Ingresar tolerancia para compatibilización espectral (eg 0.05): ');
gamma=input('Ingresar Convergencia de amortiguamiento gamma (eg 1): '); %Este
factor especifica la fracción de ajuste realizada a la serie de tiempo de
aceleración en cada iteración (parámetro de relajación)
```

```

scaleFlag=input('Ingresar scaleFlag si se desea escalar a PGA (eg 0): '); % 0
no se escala, 1 se escala antes y después de cada iteración, 2 se escala antes
de la primera iteración
scalePGA=input('Ingresar PGA al que se quiere escalar en g (eg 0.45): '); %
PGA al que se quiere escalar
dtFlag=input('Ingresar flag de interpolación (eg 1): '); % para interpolar en
pequeños pasos de tiempo, modificando la aceleración
evMin=input('Ingresar mínimo valor propio [eigenvalue] (eg 1.0e-4): '); %
Mínimo valor propio
groupSize=input('Ingresar tamaño del grupo de frecuencia (eg 20): '); % Tamaño
del grupo de frecuencia para definir el número de grupos para trabajar
maxFreq=input('Ingresar máxima frecuencia en Hz (eg 45): '); % Máxima
frecuencia para compatibilizar
freqmatch=input('Ingresar rango de frecuencias (fmin, fmax in Hz, eg [1 32;0.5
32;0.3 32;0.2 32]): '); % Rango de frecuencias para compatibilización (fmin,
fmax in Hz) para cada paso de ajuste
scale1=input('Ingresar factor de escala (eg 1): '); % Factor de Escala si es
que se desea escalar el registro

% Convertir maxFreq a radianes
maxFreq = maxFreq * 2 * pi;

% Parámetros Registro
fprintf('\nPARÁMETROS REGISTRO\n')
Fs=input('Frecuencia de muestreo en muestras/seg (eg 200): '); % Número de
muestras/seg
dt=1/Fs; % Intervalo de tiempo
pad=input('Requiere padding, 1=Sí, 2=No: ');
nAdded=input('Número de puntos para agregar al registro (si requiere padding)
(eg 0): '); % Número de puntos para agregar al registro (si requiere padding)

% Parámetros espectro de diseño (Target)
fprintf('\nPARÁMETROS TARGET\n')
damp=input('Razón de amortiguamiento (eg 0.05): '); %Razón de amortiguamiento
nDamp=length(damp); % Número de amortiguamientos para ocupar

%% Hora inicio
disp(' '),reloj=clock;
fprintf('Hora Inicio = %d:%d\n',reloj(4),reloj(5))

%% Fecha
fprintf('Fecha = %d/%d/%d\n',reloj(3),reloj(2),reloj(1))

%% Leer Target
load target.txt

%% Leer Aceleración
load registro.txt
filas=size(registro,1); %Número de Filas
columnas=size(registro,2); %Número de Columnas
N=filas*columnas; % Número de Puntos de aceleraciones

%% Reformar aceleración si es necesario
if columnas > 1
    a = reshape(registro',N,1); %Reformar aceleración en una columna
else
    a = registro;

```

```

end

acc=a;

tic; %Para medir tiempo
%% Loop sobre el paso de ajuste (Run1,Run2,...,RunN)
for irun=1:nb_runs
    %% Inicializar
    n_b = 0; % Inicializar número de puntos agregados al registro de
    aceleración
    t_before = 0; % Tiempo anterior para padding

    %% Leer Parametros para pasadas (por cada Run)
    [maxIter,freqMatch]=RdRunParam(irun,maxiter,freqmatch);

    %% Leer Target

    [Q_all,beta_all,w_all,nQ_all,target2,w,minFreq,nFreq,freq]=RdTarget(damp,nDamp
    ,freqMatch,target);

    %% Leer aceleración
    [acc,nPts,dt,nAdded]=RdAcc(acc,dt,dtFlag,nAdded);

    %% Calcular espectro de respuesta de aceleración inicial según paso de
    ajuste
    [~,R0,P]=calcespectros(acc,dt,w_all,beta_all,nQ_all,1);

    %% Calcular desajuste inicial desde Target
    [~,aveMisfit,misfit,iFreq]=CalcMisfit(R0,Q_all,nQ_all,P,freqMatch,w_all);
    MaxMisfit=(R0(iFreq)-Q_all(iFreq))/Q_all(iFreq); % Máximo desajuste
    espectral
    fprintf('\nSOLUCIÓN INICIAL, RUN%d\n',irun)
    fprintf('AveMisfit : %.4f\n',aveMisfit) % Desajuste promedio
    fprintf('MaxMisfit : %.4f\n',MaxMisfit) % Máximo desajuste espectral
    fprintf('Freq(Hz) : %.4f\n',w_all(iFreq)/(2*pi)) % Frecuencia de máximo
    desajuste espectral
    fprintf('Damping : %.4f\n',beta_all(iFreq)) % Razón de amortiguamiento

    %% Hacer ajuste inicial a aceleración escalando a PGA o a otros períodos
    [pga]=FindPga ( acc ); % Encontrar PGA
    fprintf('PGA (g) : %.4f\n',pga)

    if ( scaleFlag >= 1 )
        [acc,R0]=ScaleToPga ( scalePGA, acc, R0, Q_all );
        [pga]=FindPga ( acc );

    [~,aveMisfit,misfit,iFreq]=CalcMisfit(R0,Q_all,nQ_all,P,freqMatch,w_all);
    MaxMisfit=(R0(iFreq)-Q_all(iFreq))/Q_all(iFreq);
    disp(' ')
    disp('SOLUCIÓN ESCALADA')
    fprintf('AveMisfit : %.4f\n',aveMisfit)
    fprintf('MaxMisfit : %.4f\n',MaxMisfit)
    fprintf('Freq(Hz) : %.4f\n',w_all(iFreq)/(2*pi))
    fprintf('Damping : %.4f\n',beta_all(iFreq))
    fprintf('PGA (g) : %.4f\n',pga)
end

```

```

%% Aplicar factor de escala a la serie de tiempo de aceleración
acc=acc.*scale1;

%% Iterar hasta que el máximo desajuste sea menor que la tolerancia
iter = 1; % Inicializar número de iteraciones

% Guardar solución inicial solo en caso sea suficientemente buena y no
iteraciones necesarias
[accSave,bestMisfit]=SaveSoln( acc, misfit );

while ( misfit > tol && iter <= maxIter ) % tol y maxIter definidos en
input de parámetros de cada paso de ajuste (Run)
    for iDamp=1:nDamp
        % Cargar vectores del target y amortiguamiento
        [nQ,Q,beta]=LoadQ_array(nFreq,nDamp,target2,damp,iDamp);

        % Subdividir Target en subgrupos

[w1,beta1,Q1,nQ1,nGroup,i1,k]=SubdivideTarget(nQ,Q,w,beta,groupSize,maxFreq);

        % Hacer la Compatibilización Espectral

[misfit,acc,R,iFreq,aveMisfit,n_b,t_before,~,tPeak]=DoMatch(nGroup,Q1,w1,beta1
,acc,nPts,dt,Q_all,nQ1,evMin,gamma,scaleFlag,w_all,beta_all,nQ_all,scalePGA,fr
eqMatch,n_b,t_before,pad); %#ok<NASGU>
        MaxMisfit=(R(iFreq)-Q_all(iFreq))/Q_all(iFreq);
        fprintf('\nFULL SET, RUN%d\n',irun)
        fprintf('Iteración : %d\n',iter)
        fprintf('AveMisfit : %.4f\n',aveMisfit)
        fprintf('MaxMisfit : %.4f\n',MaxMisfit)
        fprintf('Freq(Hz) : %.4f\n',w_all(iFreq)/(2*pi))
        fprintf('Damping : %.4f\n',beta_all(iFreq))
        fprintf('PGA(g) : %.4f\n',max(abs(acc)))
        % Si esta solución es mejor que la anterior, se guarda la
        aceleración
        % Esto permite mantener el mejor ajuste en caso que la solución
        comience a divergir
        if ( misfit < bestMisfit )
            [accSave,bestMisfit]=SaveSoln ( acc, misfit );
        end
    end
    iter = iter + 1;
end

%% Recalcular espectro para la mejor solución
[tPeak,R,P]=calcespectros(accSave,dt,w_all,beta_all,nQ_all,1);
[~,~,misfit,iFreq]=CalcMisfit(R,Q_all,nQ_all,P,freqMatch,w_all);
[pga]=FindPga(accSave);

Freq=w_all'/(2*pi);
Target=Q_all';
Computed=R';
Initial=R0';
tPeak=tPeak';

disp(' ')
if ( iter <= maxIter)

```

```

        fprintf('Solution converged in %d iterations\n',iter);
    else
        fprintf('Solution did not converge in maximum number of
iterations\n');
    end

    fprintf('Maximum misfit = %.3f percent\n',misfit*100);

    %% Escribir Output
    fprintf('N added in previous run(s): %d\n',nAdded)
    fprintf('N_before: %d\n',n_b)
    fprintf('nPts: %d\n',nPts)
    fprintf('dt: %.3f\n',dt)
    nAdded=n_b+nAdded;

    % Obtener el Path de la carpeta Actual
    [stat,struc] = fileattrib;
    PathCurrent = struc.Name;

    n=irun;
    % Crear las rutas (Path) para carpetas y archivos
    FolderName = ['Run' num2str(n)];
    PathFolder = [PathCurrent '/RESULTADOS/' FolderName];
    NameFile = [PathFolder '/acc.txt'];
    NameFile2 = [PathFolder '/espectro.txt'];

    % Crear las carpetas para guardar los resultados
    mkdir([PathCurrent '/RESULTADOS'], FolderName);

    % Crear un archivo .txt con datos
    fileID = fopen(NameFile,'w'); %se le asignan permisos de escritura ('w')
    fileID2 = fopen(NameFile2,'w');
    fprintf(fileID, '%15.12f\n',accSave);
    fprintf(fileID2, '\n%8s %8s %8s %8s %8s\n\n' , 'Freq' , 'Target' , 'Computed'
, 'Initial' , 'tPeak');
    for i=1:length(Freq)
        fprintf(fileID2, '%8.4f %8.4f %8.4f %8.4f %8.4f\n',Freq(i),Target(i)
,Computed(i),Initial(i),tPeak(i));
    end
    fclose('all');

    %% Guardar Aceleración
    acc=accSave;
    save('accSave.txt','acc','-ascii')

end

%% Comparación de Espectros
g=981; % Aceleracion de Gravedad en [cm/s2]

% Target
sa_diseno=target(:,2);
nFreq=length(freq);
w=2*pi*freq;
T=1./freq;

% Calcular espectros

```

```

% 'a' es el registro de aceleración original
corr=acc; % aceleración modificada
Na=length(corr); % Largo aceleración modificada
b=ones(N,1).*damp;
ba=ones(Na,1).*damp;
[kkk,A,kk] = calcespectros(a,dt,w,b,nFreq,2);
[l1l,Ac,l1] = calcespectros(corr,dt,w,ba,nFreq,2);

%% Gráficos

% Target vs acc con mi Programa y también Run
figure
plot(1./freq,sa_diseño,'g'),hold on,plot(T,Ac,'r'),legend('Target','acc')
title('Target vs acc','fontsize',14);
xlabel('T [s]'),ylabel('Aceleración [g]'),grid on

% Comparación de espectros de aceleración, acc compatibilizado y target
figure
plot(1./freq,sa_diseño,'g'),hold on, plot(T,Ac,'r'), hold on, plot(T,A,'b'),
legend('Target','acc','Registro')
title('Registro vs Target vs acc','fontsize',14);
xlabel('T [s]'), ylabel('Aceleración [g]'),grid on

%% Error

%Error de espectro de acc compatibilizado con respecto a Target
sum2=0;
deltaR2=zeros(nFreq,1);
for i=1:nFreq
    deltaR2(i) = ( sa_diseño(i) - Ac(i) );
    temp2 = abs( deltaR2(i) / sa_diseño(i) );
    sum2 = sum2 + temp2;
end
aveMisfit2 = sum2*100 / nFreq;

fprintf('\nDESAJUSTE\n')
fprintf('Desajuste Promedio acc y Target : %.4f\n',aveMisfit2)

%% Mostrar PGA
fprintf('\nCÁLCULO DE PGA\n')
fprintf('Pga Registro [g] : %.4f\n',max(abs(a)))
fprintf('Pga acc [g] : %.4f\n',max(abs(corr)))
fprintf('Pga Target [g] : %.4f\n',sa_diseño(nFreq))

%% Comparar Registros

t=0:1/Fs:(N-1)*(dt);%Vector tiempo
ta=0:dt:(Na-1)*dt;

% Registro vs acc compatibilizado
figure, plot(t,a,'b'), hold on, plot(ta,corr,'r')
legend('Registro','acc'), title('Registro vs acc','fontsize',14);
xlabel('T [s]'), ylabel('Aceleración [g]'),grid on

%% Destruktividad Sísmica

```

```

% IA para graficar registro
suma=0;
IA=zeros(1,N);
for i=1:N
    suma=suma+(a(i)*g)^2;
    IA(i)=(pi/(2*g))*(dt/2*(2*suma));
end

% IA para graficar acc
suma=0;
IAr=zeros(1,Na);
for i=1:Na
    suma=suma+(corr(i)*g)^2;
    IAr(i)=(pi/(2*g))*(dt/2*(2*suma));
end

%Intensidad de Arias
IA1=IArias(a,Fs);
IA2=IArias(corr,Fs);

%Intensidad de Housner
IH1=IHousner(a*g,b,dt);
IH2=IHousner(corr*g,ba,dt);

% Potencial destructivo
PD1=PDestructivo(a,Fs,0,(N-1)*dt);
PD2=PDestructivo(corr,Fs,0,(Na-1)*dt);

%Imprimir en pantalla
fprintf('\nCÁLCULO DE INTENSIDAD DE ARIAS\n')
fprintf('IA Registro [cm/s]           : %.3f\n',IA1);
fprintf('IA acc [cm/s]                   : %.3f\n',IA2);

fprintf('\nCÁLCULO DE INTENSIDAD DE HOUSNER\n')
fprintf('IH Registro [cm]                  : %.3f\n',IH1);
fprintf('IH acc [cm]                       : %.3f\n',IH2);

fprintf('\nCÁLCULO POTENCIAL DESTRUCTIVO\n')
fprintf('PD Registro [cm*s]                : %.3f\n',PD1);
fprintf('PD acc [cm*s]                     : %.3f\n',PD2);

%% Gráficos Destructividad Sísmica

% IA normalizado registro vs acc compatibilizado
figure,plot(t,IA./IA1*100,'b'),hold
on,plot(ta,IAr./IA2*100,'r'),legend('Registro','acc')
title('Intensidad de Arias, Registro vs acc','fontsize',14);
xlabel('Tiempo [s]'),ylabel('IA Normalizado(%)'),grid on

%% Fin
tiempo=toc;
tiempo=tiempo/60;
fprintf('\nTiempo: %.3f minutos\n',tiempo);
% Hora Termino
reloj=clock;
fprintf('Hora Término = %d:%d\n',reloj(4),reloj(5))

```

### A.3. VALIDACIÓN DEL PROGRAMA IMPLEMENTADO EN MATLAB

El programa de compatibilización espectral se implementa en el software Matlab, a partir del programa RspMatch realizado por Al Atik y Abrahamson (2010). Mediante ambos programas se hacen comparaciones con distintos registros chilenos para observar las diferencias que se tiene al realizar la compatibilización espectral a dichos registros y también para poder comparar las propiedades de estos, es decir, la comparación de los registros reales con los registros compatibilizados, calculando en ambos casos, PGA, Intensidad de Arias, Intensidad de Housner y Potencial Destructivo.

Para poder realizar la compatibilización de espectros se utilizan los registros que se muestran en la Tabla A.1:

Tabla A.1: Registros utilizados para compatibilización espectral.

<b>Registro</b>	<b>Año</b>
Cerro Calán NS	2010
Llolleo DirL	2010
Melipilla NS	1985
Santiago DirL	1985
Talca DirT	1985

Donde:

NS: Dirección Norte-Sur.

DirL: Dirección Longitudinal.

DirT: Dirección Transversal.

Los registros descritos en la Tabla A.1 se normalizan a un PGA para facilitar la compatibilización espectral. Para el Registros de Cerro Calán se normaliza a un PGA de 0.4 [g], mientras que los registros restantes se normalizan a un PGA de 0.3 [g].

En las siguientes secciones se muestran la comparación de espectros obtenidos mediante los dos programas utilizados (considerando un 5% de razón de amortiguamiento), así como también las propiedades de los registros reales y los modificados. Cabe destacar que ACC1 se refiere a la aceleración compatibilizada por Matlab, RUN1 se refiere a la aceleración compatibilizada por RspMatch, y el número significa el número de pasadas o pasos de ajuste en que se modifica la aceleración en el programa.

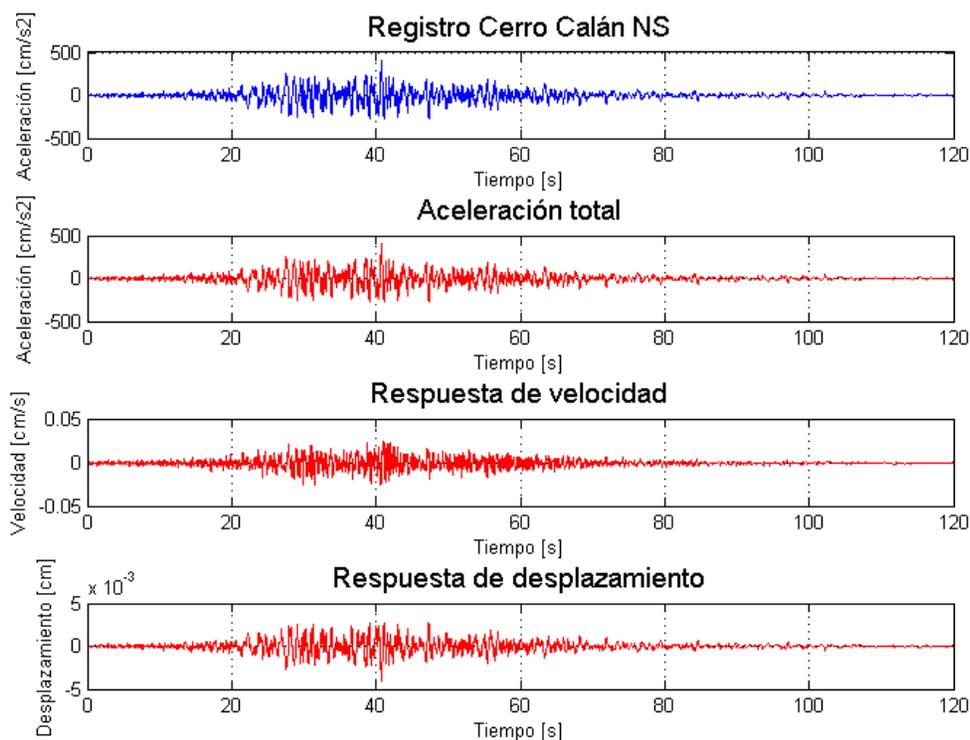
### A.3.1. REGISTRO CERRO CALÁN 2010

#### Compatibilización Espectral

Para realizar la compatibilización espectral, se utiliza el registro de aceleración Norte-Sur de Cerro Calán para el terremoto del Maule en el 2010 y el espectro de diseño de la Norma Chilena NCh 433 Of. 96 (Target).

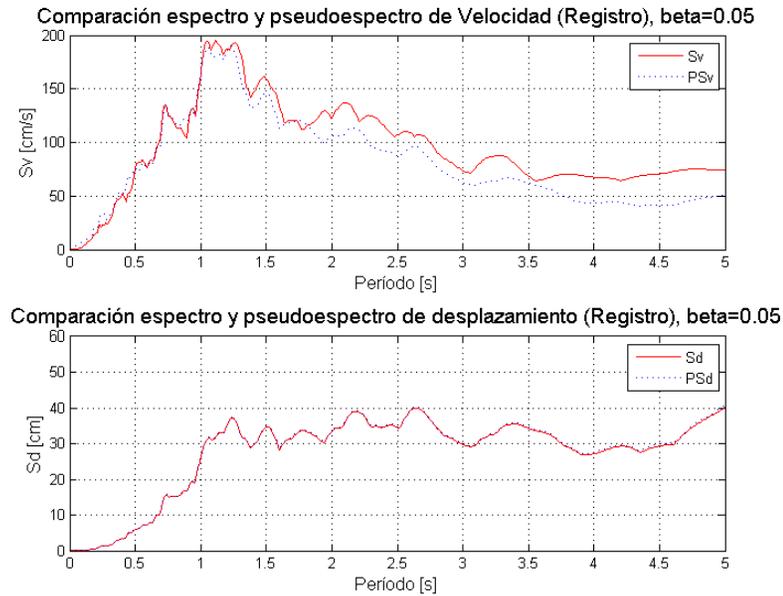
En primer lugar, utilizando el método de Nigam y Jennings (1969), es posible determinar la respuesta de velocidad y desplazamiento a partir de un oscilador de un grado de libertad sometido en su base ante un registro de aceleración, para posteriormente poder calcular los espectros de respuesta mediante las máximas respuestas del oscilador.

En la Figura A.1 es posible visualizar la respuesta en el tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento a partir del registro del terremoto antes mencionado, para una razón de amortiguamiento (5%), variación de tiempo y frecuencia dados.



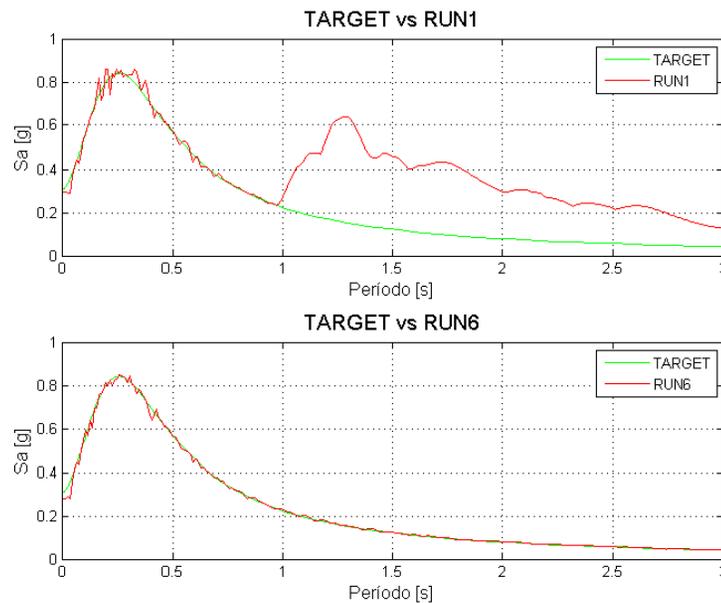
**Figura A.1:** Respuesta de velocidad y desplazamiento a partir del registro.

En la Figura A.2 se puede observar la comparación de los espectros (S), y pseudoespectros (PS) de velocidad y desplazamiento del registro del terremoto. Cabe destacar que para el caso del desplazamiento, los espectros coinciden, y para el caso de la velocidad no coinciden completamente, viéndose una disminución en el pseudoespectro de velocidad para períodos más altos.



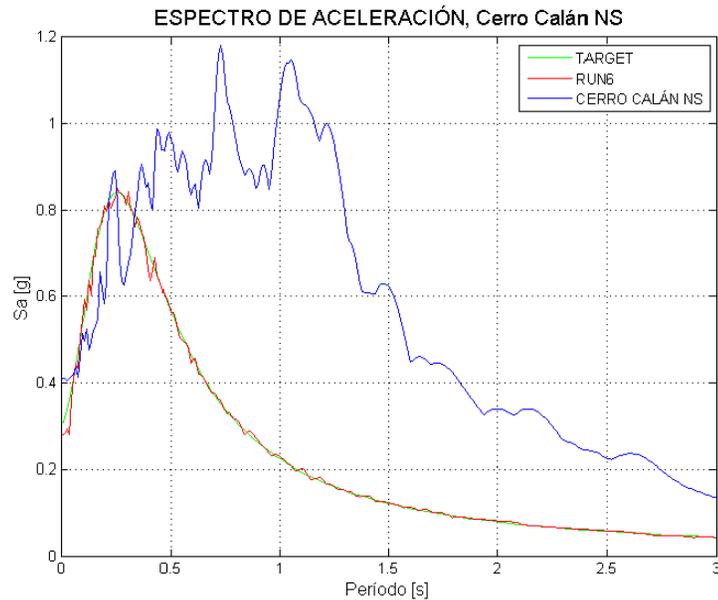
**Figura A.2:** Comparación de espectro y pseudoespectro.

A continuación se muestra la compatibilización del registro de aceleración NS de Cerro Calan para el terremoto del Maule en el 2010 (Run), con el espectro de la norma chilena (Target), utilizando el método de Al Atik y Abrahamson (2010). En un primer paso de ajuste del programa de compatibilización espectral (Figura A.3), se tiene que el espectro no ha sido compatibilizado totalmente, y sólo se ha logrado compatibilizar en la zona de períodos cortos, ya que en esa zona el espectro de aceleración es influenciado por periodos largos de las wavelets. Sin embargo, después de hacer los pasos de ajustes correspondientes para una precisión deseada, es posible tener la compatibilización completa (Run6).



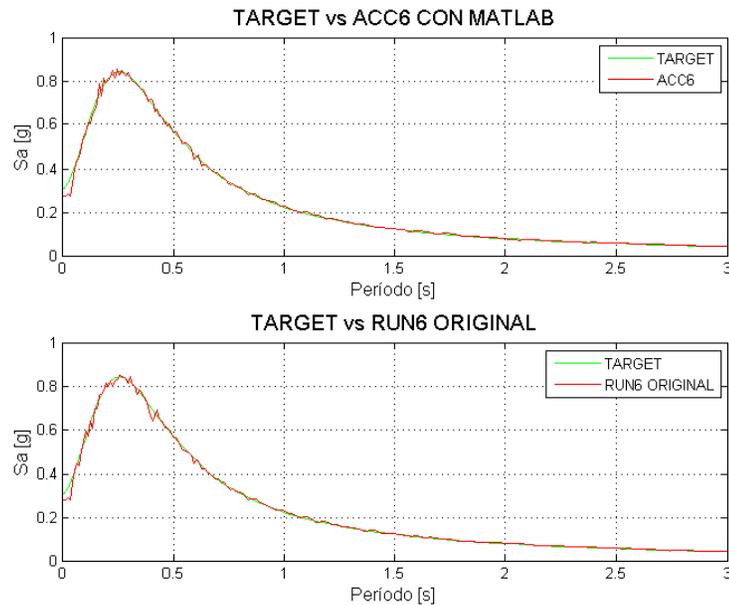
**Figura A.3:** Compatibilización de espectros mediante RspMatch para el primer y último paso de ajuste.

En la Figura A.4 se comparan los espectros del registro original, y del registro compatible mediante el programa RspMatch y el Target (espectro de diseño de la norma). La diferencia entre el Target y el espectro de respuesta del registro es de gran magnitud, y esto se puede explicar por la topografía de la zona donde se registró la aceleración del terremoto. Por lo tanto, las propiedades del registro compatible no serán similares a las del registro real, ya que al hacer el proceso de compatibilización, el registro es modificado sustancialmente por las diferencias existentes entre los espectros.



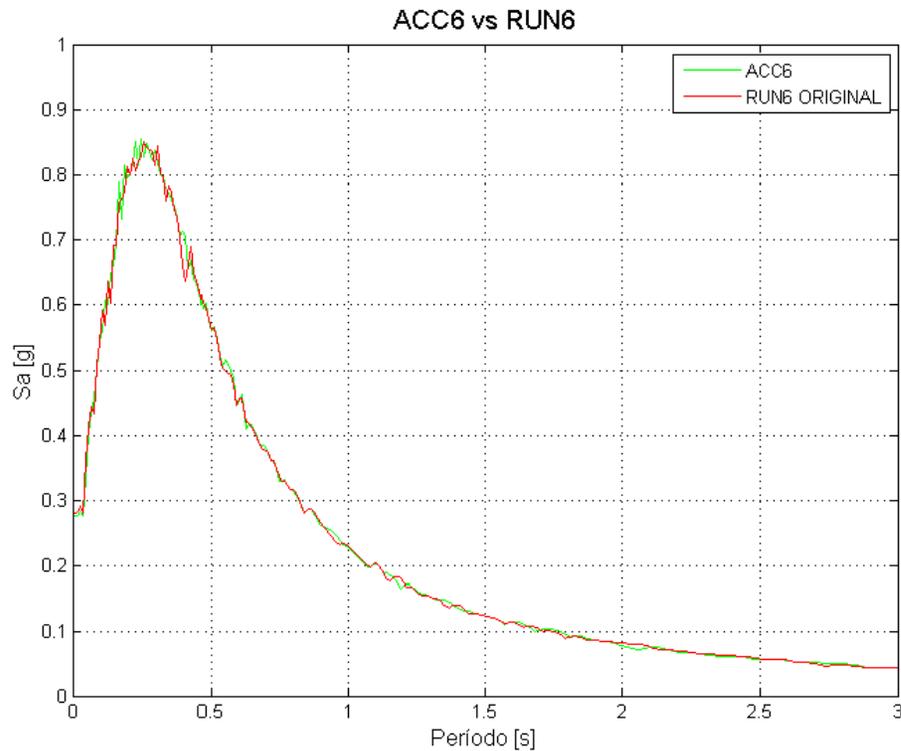
**Figura A.4:** Compatibilización de espectros y espectro de respuesta del registro.

En la Figura A.5 se puede ver la compatibilización espectral mediante Matlab (superior) y RspMatch (inferior).



**Figura A.5:** Compatibilización de espectros mediante Matlab (Superior) y RspMatch (inferior).

La Figura A.6 muestra la comparación entre los espectros compatibilizados mediante Matlab y RspMatch.



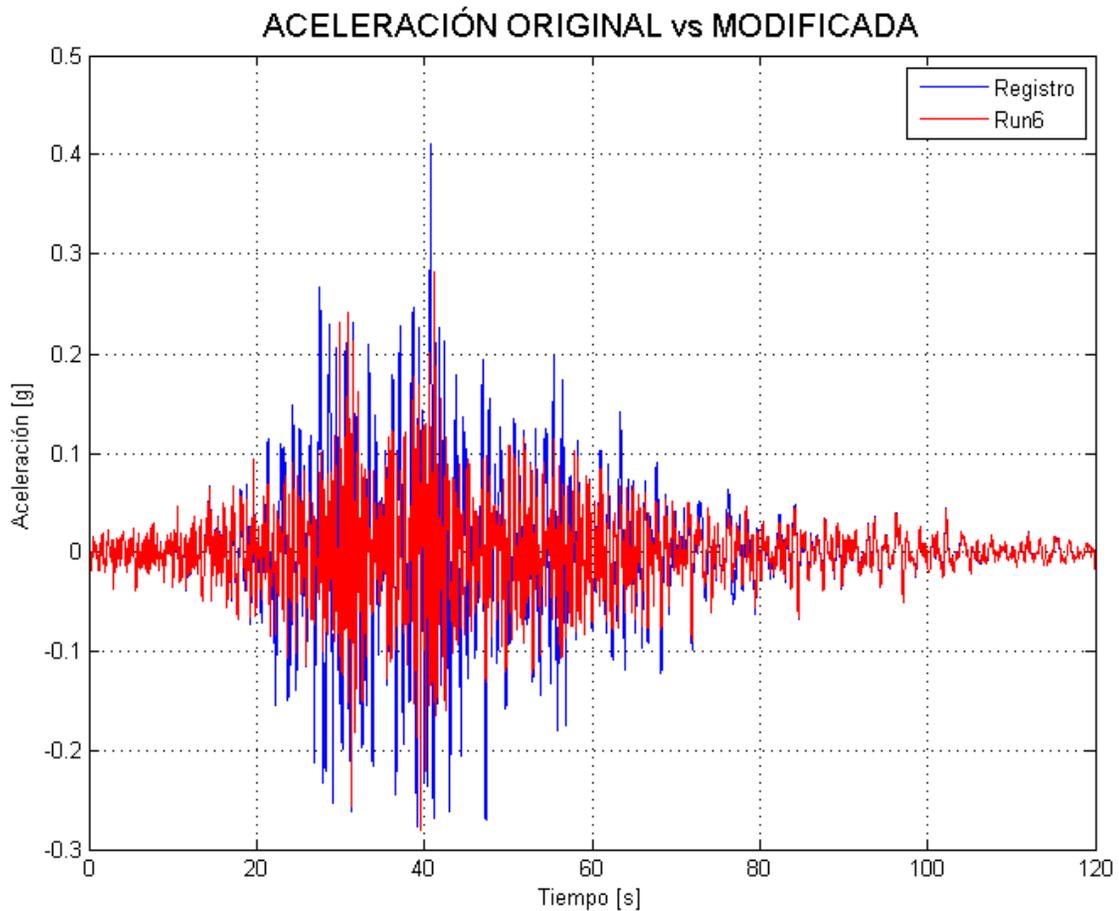
**Figura A.6:** Comparación de espectros compatibilizados mediante Matlab y RspMatch.

En las figuras anteriores se puede observar la similitud entre la compatibilización realizada por el programa RspMatch y el programa mediante Matlab, sin embargo, los espectros no se superponen completamente, por lo que la compatibilización espectral utilizando ambos programas tiene algunas variaciones. La diferencia de resultados, puede deberse a errores numéricos en la precisión de los cálculos, distintos lenguajes de programación, aproximaciones de resultados de sus funciones, diferentes cifras significativas al realizar los distintos cálculos que se tienen al utilizar los distintos programas, a pesar de que el input, el target y las funciones que se utilizan para ambos programas son los mismos. Un caso de ejemplo es el valor de los decimales del número pi, donde los valores en las iteraciones y propiedades de los registros varían al utilizar todos los decimales de Matlab, o con el valor de pi truncado. Por lo tanto, teniendo en consideración lo anterior, los resultados que se obtienen al realizar el proceso de compatibilización espectral no son completamente iguales, pero si se puede observar un comportamiento de resultados similares al utilizar el programa original RspMatch y el programa implementado en Matlab.

## Destructividad Sísmica

En este punto se muestran los resultados obtenidos de la destructividad sísmica del registro de aceleración NS de Cerro Calan para el terremoto del Maule en el 2010 y del registro compatibilizado mediante el programa RspMatch y Matlab.

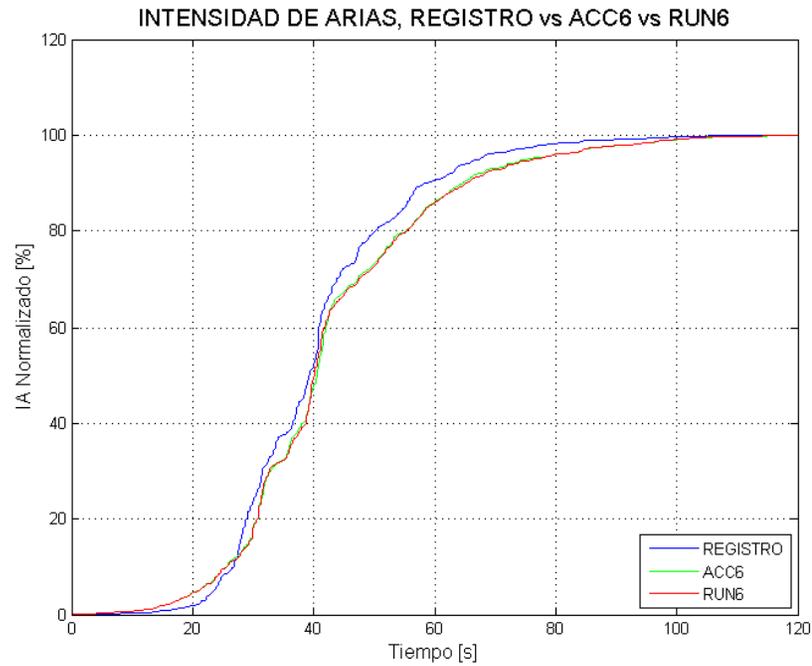
La Figura A.7 presenta el registro original de color azul versus el registro compatibilizado mediante RspMatch de color rojo, observándose que la aceleración compatibilizada tiene valores menores comparado con el registro original, lo cual da un indicio de cuál será el resultado de la comparación de las propiedades de ambos registros.



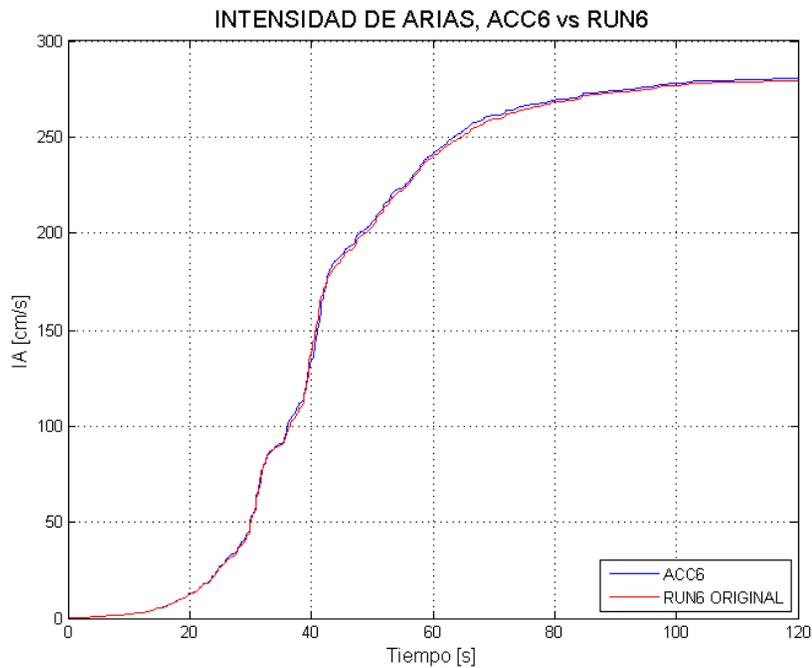
**Figura A.7:** Registro original v/s Registro compatibilizado, mediante RspMatch.

Las Figuras A.8 y A.9 presentan los gráficos de Intensidad de Arias del registro real y del registro compatibilizado mediante los dos programas. La Figura A.8 muestra la normalización de la intensidad de Arias, el cual se obtiene dividiendo por la intensidad de Arias de cada registro. Dicha Figura, demuestra que la distribución de energía dentro del registro compatibilizado es similar al registro original, y el contenido total de energía varía en un pequeño porcentaje al adicionar el ajuste de la wavelet. La Figura A.9 muestra la comparación de Intensidad de Arias Normalizado de los registros compatibilizados mediante los dos programas, donde se observa un

comportamiento similar al utilizar ambos programas, sin embargo, como se mencionó anteriormente, los resultados tienen diferencias, a pesar de su similitud, ya que como se puede ver en la Figura A.9, las curvas de intensidad no se superponen completamente.



**Figura A.8:** Intensidad de Arias normalizado del registro real y compatibilizado por los dos programas.



**Figura A.9:** Intensidad de Arias del registro compatibilizado (acc6 vs Run6).

### A.3.2. COMPARACIÓN CON OTRAS MODIFICACIONES AL PROGRAMA

El programa RspMatch calcula pseudoespectros de aceleración mediante el método de Newmark para posteriormente comparar la diferencia entre el espectro de respuesta de aceleración del registro y el Target. En las figuras anteriores se utilizó dicho método, sin embargo, en el programa implementado en Matlab, también se calcula el pseudoespectro de aceleración con el método de Nigam y Jennings (1969), para poder optimizar el tiempo de ejecución del programa.

Para verificar los resultados del programa implementado en Matlab, se hacen una serie de comparaciones con el programa de compatibilización espectral original RspMatch, utilizando el registro de Cerro Calán del año 2010. Se calculan las propiedades de los registros compatibilizados mediante los dos programas, incluyendo el cálculo del pseudoespectro de aceleración con el método de Nigam y Jennings (1969), en el programa realizado en Matlab.

Los resultados se separan según las modificaciones que se le hacen al registro en el programa, como por ejemplo, utilizar distintos rangos de frecuencias, o utilizar el registro escalado al PGA, etc. Se explica cada modificación realizada a continuación:

**Calán 1:** Son los resultados de las figuras mostradas anteriormente con el método de Newmark. Se utiliza un rango de frecuencias entre 0.1 y 32 Hertz.

**Calán 2:** Se modifica el programa, realizando los cálculos de pseudoespectros de aceleración con el método de Nigam y Jennings (1969). Se utiliza un rango de frecuencias entre 0.1 y 32 Hertz.

**Calán 3:** Se modifica el programa, realizando los cálculos de pseudoespectros de aceleración con el método de Nigam y Jennings (1969). También se utiliza un rango de frecuencias entre 0.1 y 100 Hertz. Además se escala el registro al PGA del Target en cada paso de ajuste que tiene el registro.

**Calán 4:** Se modifica el programa, realizando los cálculos de pseudoespectros de aceleración con el método de Nigam y Jennings (1969). Además se utiliza un rango de frecuencias entre 0.1 y 100 Hertz.

Cabe mencionar que el rango de frecuencias utilizado por el programa RspMatch para realizar la compatibilización de espectros, funciona generalmente hasta 32 Hertz, lo cual en ocasiones es una desventaja para realizar la compatibilización para frecuencias más altas.

A continuación se presenta una tabla resumen de las propiedades del registro real y los registros compatibilizados mediante Matlab y RspMatch en la Tabla A.2. Para un mejor entendimiento se explica la nomenclatura de la tabla.

PGA: Peak Groun Acceleration.

IA: Intensidad de Arias.

IH: Intensidad de Housner.

PD: Potencial Destructivo.

M: Resultado de Matlab.

Rsp: Resultado de RspMAtch.

Target: Espectro de diseño.

Real: Registro real.

Cabe destacar que el PGA del Target mostrado en las tablas, se refiere al primer punto del espectro de diseño, es decir, el punto del espectro con su frecuencia más alta, ya que ésta no puede ser infinita, por lo tanto el PGA del Target en este trabajo, no es cuando el período es nulo, sino más bien, se refiere al punto del espectro más cercano al período cero.

También se hace la comparación entre el error en porcentaje que se tiene entre los programas utilizados, y también con respecto al target. Por ejemplo, para el caso de M vs Rsp, se refiere al error que tiene al realizar la compatibilización en Matlab con respecto al programa RspMatch.

El error se puede representar como un desajuste espectral promedio de la siguiente forma:

$$DesajustePromedio = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \left| \frac{Sa(T_i) - Sa_{target}(T_i)}{Sa_{target}(T_i)} \right| \cdot 100 \quad (A.3)$$

Donde:

$Sa(T_i)$ : Espectro de aceleración del registro compatibilizado en el período  $T_i$ .

$Sa_{target}(T_i)$ : Espectro de aceleración del target en el período  $T_i$ .

$N_p$ : Número de puntos del registro.

Tabla A.2: Resultados obtenidos por el programa en Matlab y RspMatch del Registro Cerro Calan NS.

Registro, Programas y Target		Propiedades				Error [%]		
		PGA [g]	IA [cm/s]	IH [cm]	PD [cm*s]	M vs Rsp	M vs Target	Rsp vs Target
Calán 1	Real	0.4099	667.341	152.245	33.438	2.840	5.652	4.575
	Matlab	0.2755	280.514	41.514	8.707			
	RspMatch	0.2808	279.374	47.887	9.345			
	Target	0.3082						
Calán 2	Real	0.4099	667.341	152.245	33.438	9.356	4.959	4.575
	Matlab	0.3766	289.458	43.454	9.985			
	RspMatch	0.2808	279.374	47.887	9.345			
	Target	0.3082						
Calán 3	Real	0.4099	667.341	152.245	33.438	5.404	2.767	4.575
	Matlab	0.3095	221.861	48.805	7.536			
	RspMatch	0.2808	279.374	47.887	9.345			
	Target	0.3082						
Calán 4	Real	0.4099	667.341	152.245	33.438	5.547	1.845	4.575
	Matlab	0.3185	285.942	46.655	9.252			
	RspMatch	0.2808	279.374	47.887	9.345			
	Target	0.3082						

Como se puede ver desde la Tabla A.2, los valores de los parámetros sísmicos que se obtienen de la compatibilización espectral a partir de ambos programas resultan ser similares. Dependiendo del input dado al programa, los resultados varían en mayor o menor medida. Al observar los resultados de Calan 1 (los cuales se calculan para el pseudoespectro de aceleración obtenido a partir del método de Newmark), se puede apreciar que los valores son similares con las otras modificaciones realizadas en el programa, sin embargo el error de desajuste espectral con respecto al Target es mayor (5.65%). Para el caso de Calan 3, donde el registro se escala al PGA del Target en cada paso de ajuste, los resultados que se obtienen para el caso de la Intensidad de Arias y el Potencial Destructivo son menores en comparación con las otras modificaciones que se le hacen al programa. En las modificaciones de Calan 2 y Calan 4 donde el input que se ingresa tiene que ver con el rango de frecuencia al cual se realiza la compatibilización, se puede observar que para una compatibilización con un rango mayor de frecuencia, el error del desajuste espectral es menor en el caso de Calan 4, donde se usa un rango hasta 100 [Hz] obteniéndose un error de 1.85%, a diferencia con Calan 2, donde se llega hasta los 32 [Hz] con un error de 4.96%.

Las variaciones que se hacen para cada compatibilización, se realizan solamente a través del programa implementado en Matlab, ya que como se puede observar desde la tabla, los valores que se tienen para el programa RspMatch no se ven alterados en cada modificación.

### A.3.3. RESULTADOS DE OTROS REGISTROS

En esta sección se muestran los resultados de los registros restantes en la Tabla A.3, es decir, sin el registro de Cerro Calan (ver Tabla A.1). Dichos resultados se calculan con los pseudoespectros de aceleración a través del método de Nigam y Jennings (1969), y se utiliza el espectro de diseño de la Norma Chilena NCh433 como Target.

Donde:

NS: Dirección Norte Sur.

DirL: Dirección Longitudinal.

DirT: Dirección Transversal.

Tabla A.3: Resultados obtenidos por el programa en Matlab y RspMatch de los registros restantes.

Registro, Programas y Target		Propiedades				Error [%]		
		PGA [g]	IA [cm/s]	IH [cm]	PD [cm*s]	M vs Rsp	M vs Target	Rsp vs Target
Melipilla NS 1985	Real	0.3128	230.319	43.230	1.027	3.444	2.331	3.158
	Matlab	0.3150	268.513	55.556	1.284			
	RspMatch	0.2848	266.471	53.438	1.224			
	Target	0.3236						
Llolleo DirL 2010	Real	0.3101	447.366	63.875	8.331	5.471	1.9075	4.3484
	Matlab	0.3182	363.143	58.235	6.603			
	RspMatch	0.2645	362.281	51.442	6.602			
	Target	0.3236						
Santiago DirL Endesa 1985	Real	0.3103	281.668	73.916	2.309	3.040	3.592	2.562
	Matlab	0.2769	270.926	57.426	2.238			
	RspMatch	0.2990	264.934	52.089	2.14			
	Target	0.3236						
Talca DirT 1985	Real	0.3100	283.899	62.899	2.766	3.752	1.978	3.448
	Matlab	0.3161	273.492	53.649	2.926			
	RspMatch	0.2753	278.411	51.718	3.008			
	Target	0.3236						

Al observar los resultados de la tabla anterior, es posible ver que los parámetros sísmicos al realizar la compatibilización espectral, no varían en demasía al utilizar el programa RspMatch y el implementado en Matlab. Adicionalmente a los resultados anteriores, se realizan modificaciones al programa implementado en Matlab, lo cual se puede observar en la Tabla A.4. Dichos resultados se calculan con los pseudoespectros de aceleración a través del método de Nigam y Jennings (1969) (Espectros en descripción de la Tabla). También se utiliza un rango de frecuencia más grande en algunos casos desde 0.1 a 100 [Hz] (más frecuencia en la descripción de la Tabla A.4), así como también se escala el registro al PGA del target en otros (Escala en descripción Tabla A.4).

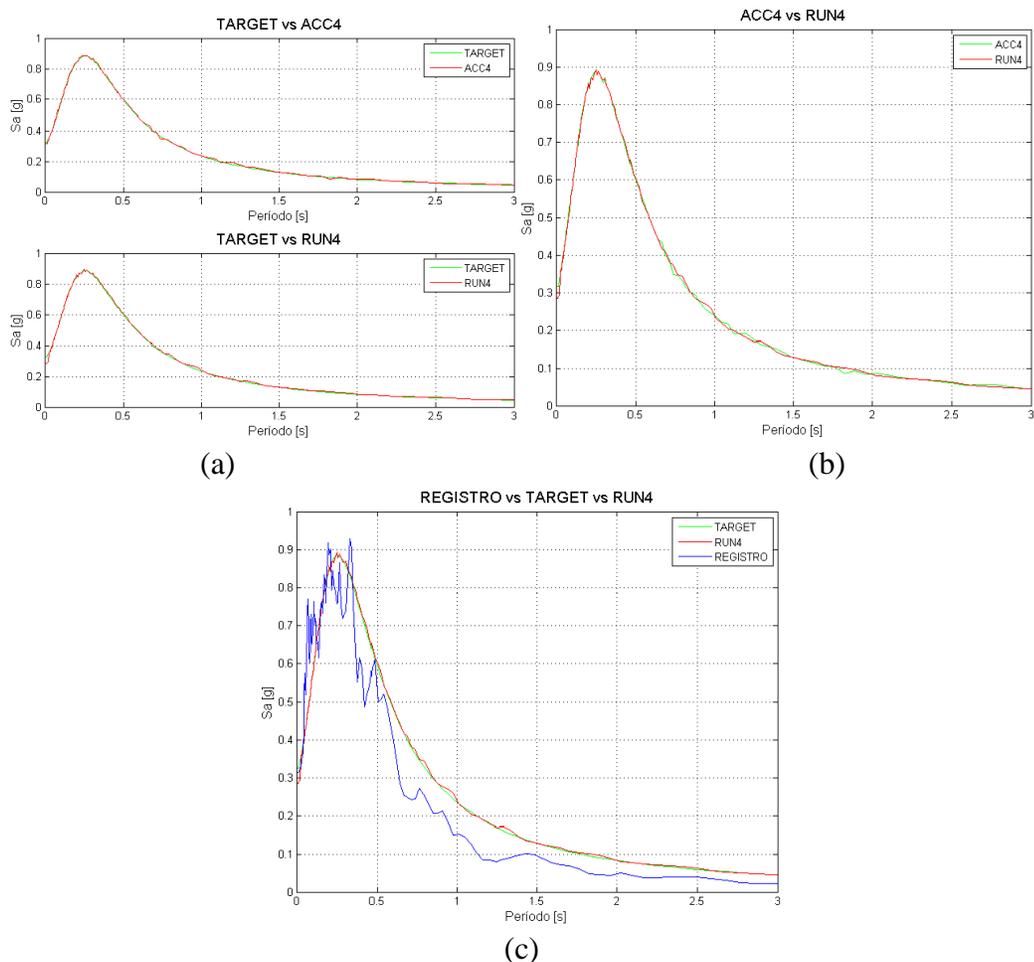
Tabla A.4: Resultados obtenidos por el programa en Matlab y RspMatch realizando modificaciones.

Descripción	Registro, Programas y Target		Propiedades				Error [%]		
			PGA [g]	IA [cm/s]	IH [cm]	PD [cm*s]	M vs Rsp	M vs Target	Rsp vs Target
Con Cálculos de Espectros	Llolleo DirL 2010	Real	0.3101	447.366	63.875	8.331	5.471	1.9075	4.3484
		Matlab	0.3182	363.143	58.235	6.603			
		RspMatch	0.2645	362.281	51.442	6.602			
		Target	0.3236						
Con Espectros y mas frecuencia	Llolleo2 DirL 2010	Real	0.3101	447.366	63.875	8.331	5.497	1.586	4.348
		Matlab	0.3013	365.113	53.549	6.936			
		RspMatch	0.2645	362.281	51.442	6.602			
		Target	0.3236						
Escalado mas frecuencia y Espectros	Llolleo3 DirL 2010	Real	0.3101	447.366	63.875	8.331	5.713	1.816	4.348
		Matlab	0.2926	509.670	54.866	9.128			
		RspMatch	0.2645	362.281	51.442	6.602			
		Target	0.3236						
Con Cálculos de Espectros	Santiago DirL Endesa 1985	Real	0.3103	281.668	73.916	2.309	3.040	3.592	2.562
		Matlab	0.2769	270.926	57.426	2.238			
		RspMatch	0.2990	264.934	52.089	2.14			
		Target	0.3236						
Escalado mas frecuencia y Espectros	Santiago2 DirL Endesa 1985	Real	0.3103	281.668	73.916	2.309	2.936	1.551	2.562
		Matlab	0.3096	404.066	49.142	3.338			
		RspMatch	0.2990	264.934	52.089	2.140			
		Target	0.3236						
Con Espectros y mas frecuencia	Santiago3 DirL Endesa 1985	Real	0.3103	281.668	73.916	2.309	2.724	1.295	2.562
		Matlab	0.2946	269.290	52.795	2.311			
		RspMatch	0.2990	264.934	52.089	2.140			
		Target	0.3236						
Con Cálculos de Espectros	Talca DirT 1985	Real	0.3100	283.899	62.899	2.766	3.752	1.978	3.448
		Matlab	0.3161	273.492	53.649	2.926			
		RspMatch	0.2753	278.411	51.718	3.008			
		Target	0.3236						

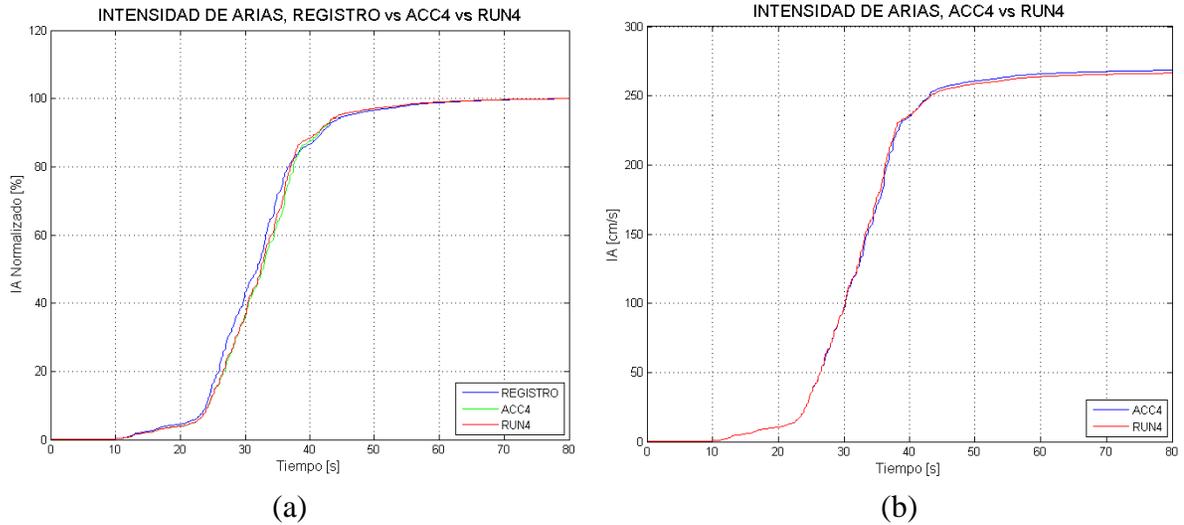
En la Tabla A.4 se puede observar que en la mayoría de los casos la diferencia en los resultados al utilizar distintos input en el programa no es de gran magnitud al utilizar el programa RspMatch y Matlab. Donde sí se puede apreciar una diferencia mayor en comparación con otras modificaciones, es en el registro Llolleo 3 en su dirección longitudinal, al cual al realizarle el proceso de compatibilización espectral, adicionalmente en cada paso de ajuste se escala el registro al PGA del target, por lo tanto los parámetros sísmicos varían en mayor medida al realizarse una mayor modificación en cada paso de ajuste haciendo el escalamiento. La mayor variación en este sentido se puede ver para el caso de la Intensidad de Arias y el Potencial Destructivo, donde la alteración del PGA tiene una mayor relevancia en estos parámetros.

A continuación se muestran los gráficos obtenidos para el registro de Melipilla en su dirección Norte-Sur, como una forma de realizar una comparación de manera más detallada de los resultados. En la Figura A.10 se muestran los espectros del registro real y los registros compatibilizados mediante Matlab y RspMatch, en la cual se puede ver que la compatibilización se hace correctamente mediante el programa implementado en Matlab. También se observa que el espectro del registro de Melipilla tiene gran similitud con el espectro de la Norma (se basa en dicho espectro), sin embargo se puede ver que el espectro del registro real está en gran parte por debajo del espectro de la Norma.

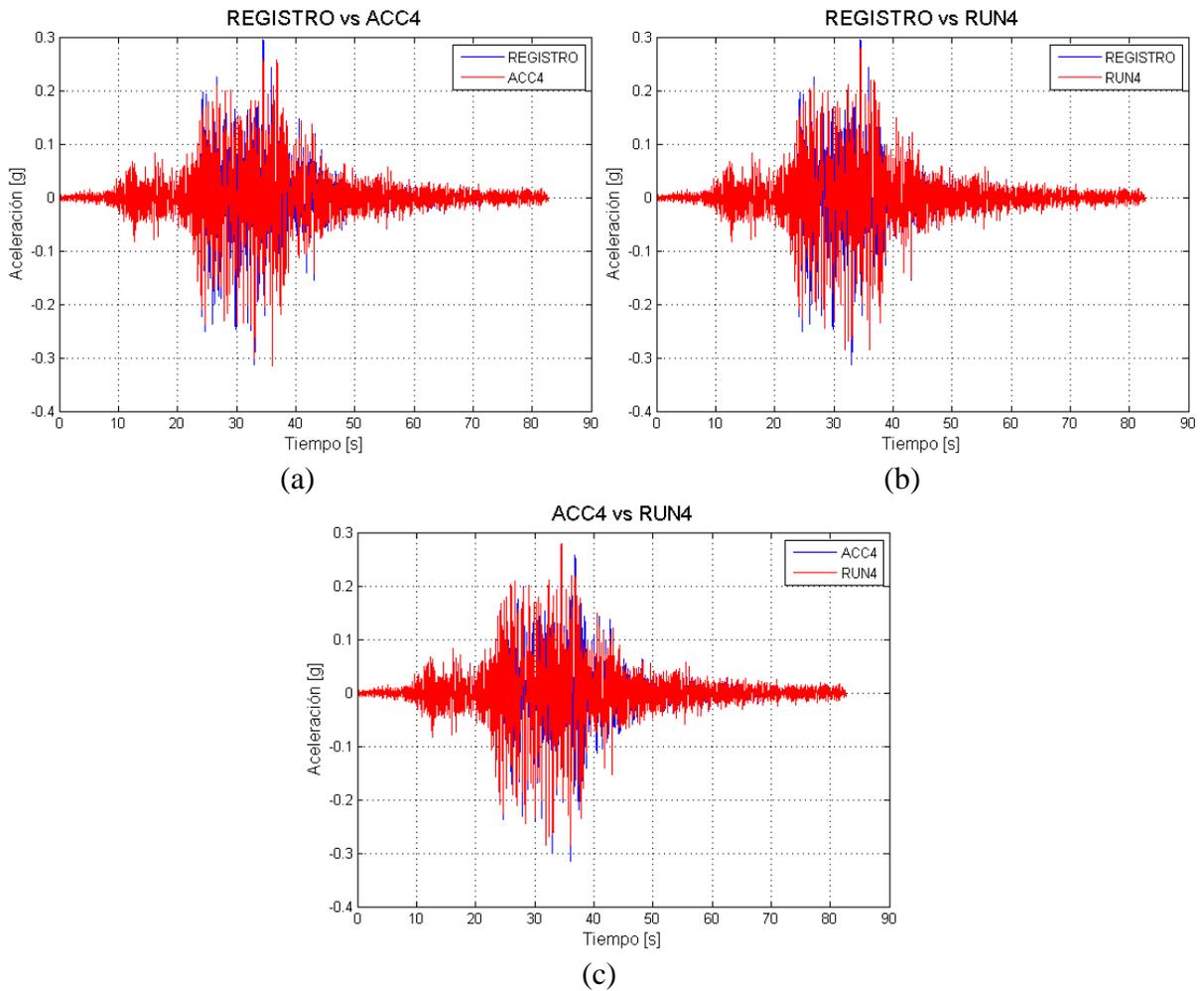
En la Figura A.11 se muestran las curvas de Intensidad de Arias Normalizadas, donde se observa que la distribución de energía de los registros compatibilizados es similar al registro real y también se hace la comparación de dicha curva para los registros compatibilizados mediante ambos programas, donde se observa gran similitud. Finalmente se muestra en la Figura A.12 la comparación del registro real y los registros compatibilizados al espectro de la norma, en la cual se observa que la distribución de los registros es similar, a pesar de la modificación que se tiene al realizar el proceso de compatibilización espectral.



**Figura A.10:** Gráficos para Comparación de espectros. (a) Compatibilización de espectros mediante Matlab (Superior) y RspMatch (inferior). (b) Comparación de espectros compatibilizados mediante Matlab y RspMatch. (c) Compatibilización de espectros y espectro de respuesta del registro Melipilla NS.



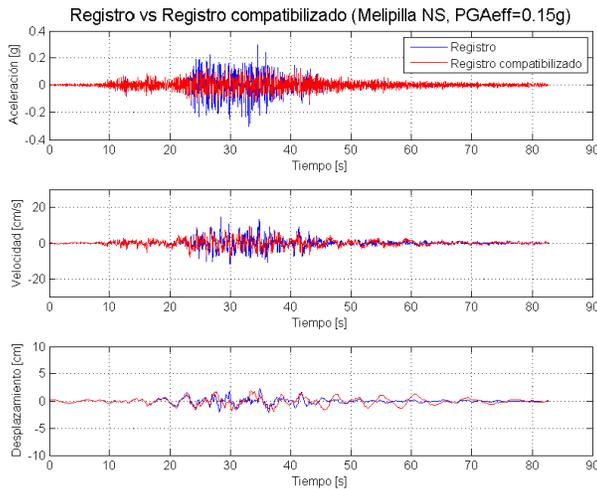
**Figura A.11:** Gráficos de Intensidad de Arias (IA) versus tiempo de registro Melipilla. (a) IA normalizado del registro real y compatibilizado por los dos programas. (b) IA de registros compatibilizados.



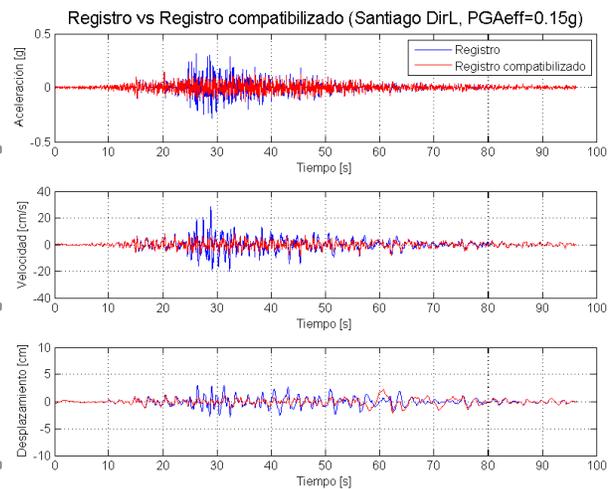
**Figura A.12:** Comparación de registro real y registros compatibilizados. (a) Registro de Melipilla (REGISTRO) versus registro compatibilizado mediante RspMatch (RUN4). (b) Registro de Melipilla (REGISTRO) versus registro compatibilizado mediante Matlab (ACC4). (c) Registro compatibilizado mediante Matlab (ACC4) versus registro compatibilizado mediante RspMatch (RUN4).

# ANEXO B

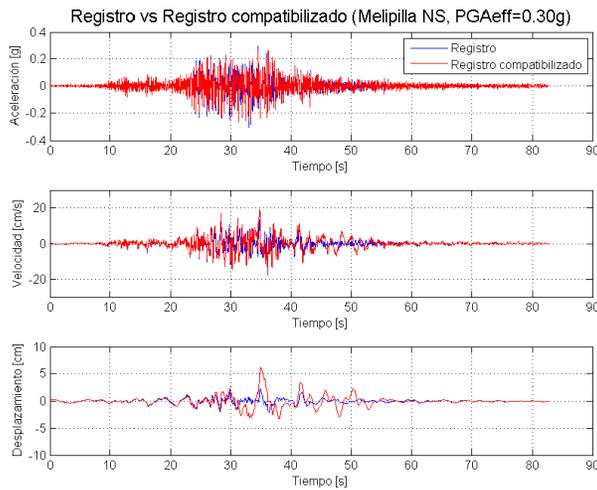
## B.1. AMPLIFICACIONES PARA ESPECTRO DE NORMA NCH433



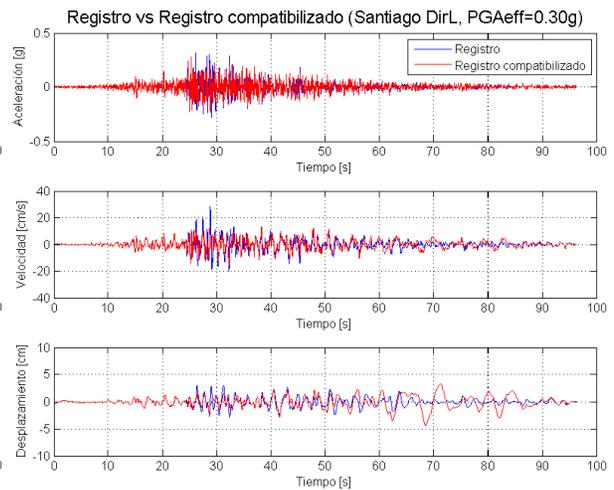
(a)



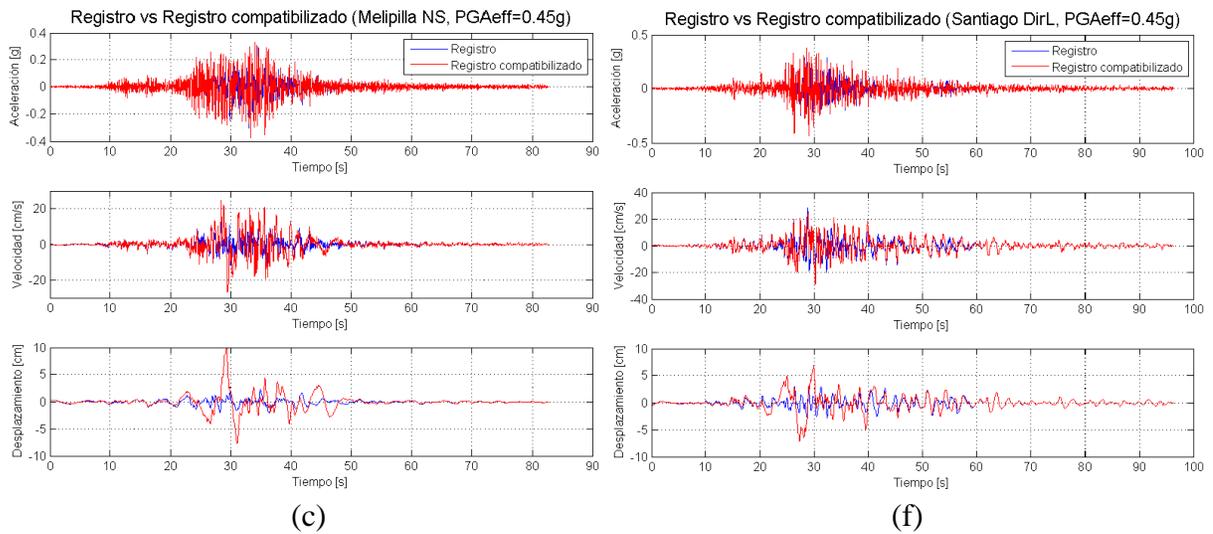
(d)



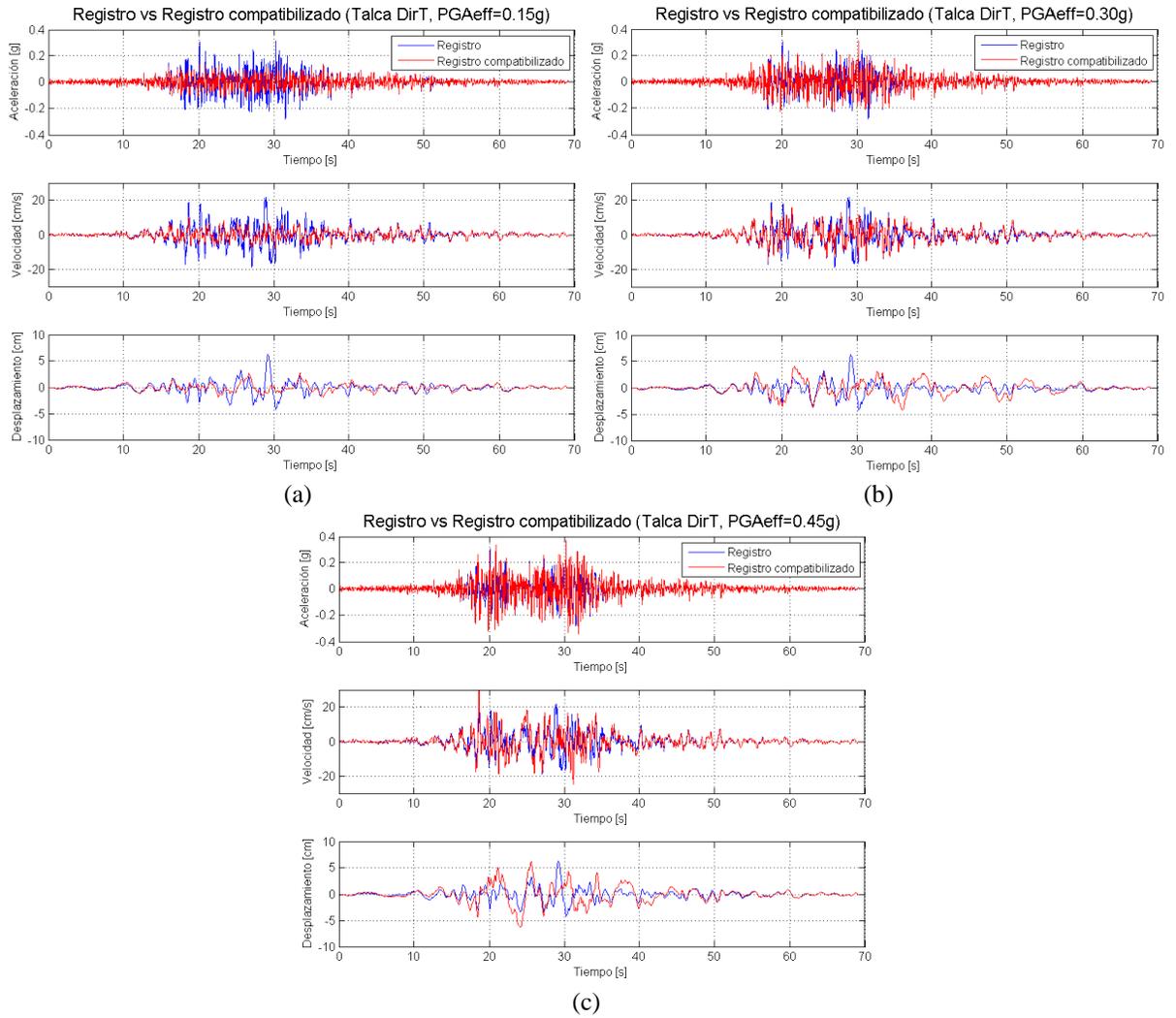
(b)



(e)



**Figura B.1:** Series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento para registros de Melipilla NS (izquierda) y Santiago DirL (Derecha), compatibilizados al espectro de la Norma a partir de amplificaciones.



**Figura B.2:** Series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento para registro de Talca DirT compatibilizado al espectro de la Norma a partir de amplificaciones.

## B.2. AMPLIFICACIONES PARA ESPECTRO CON DOS PEAKS

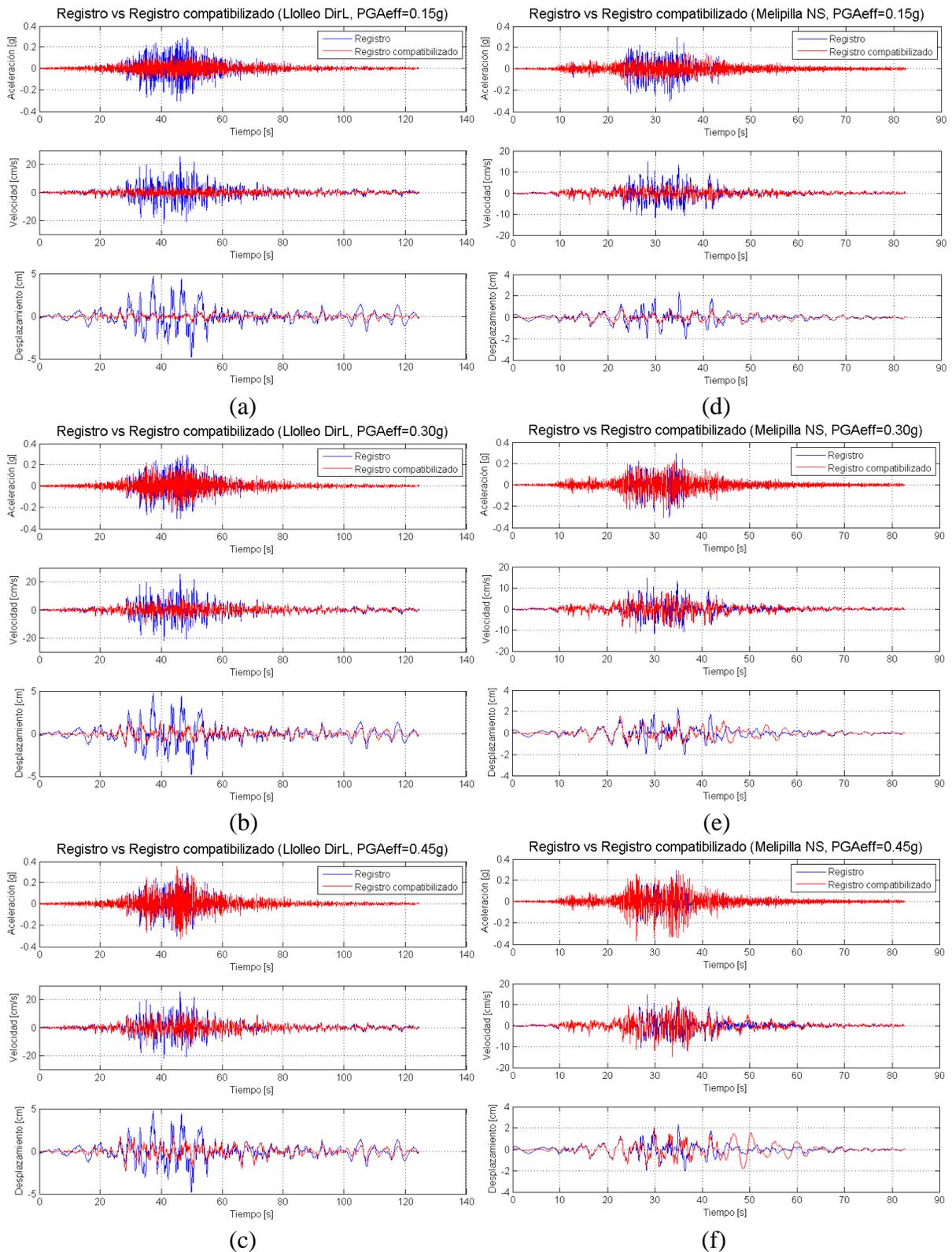
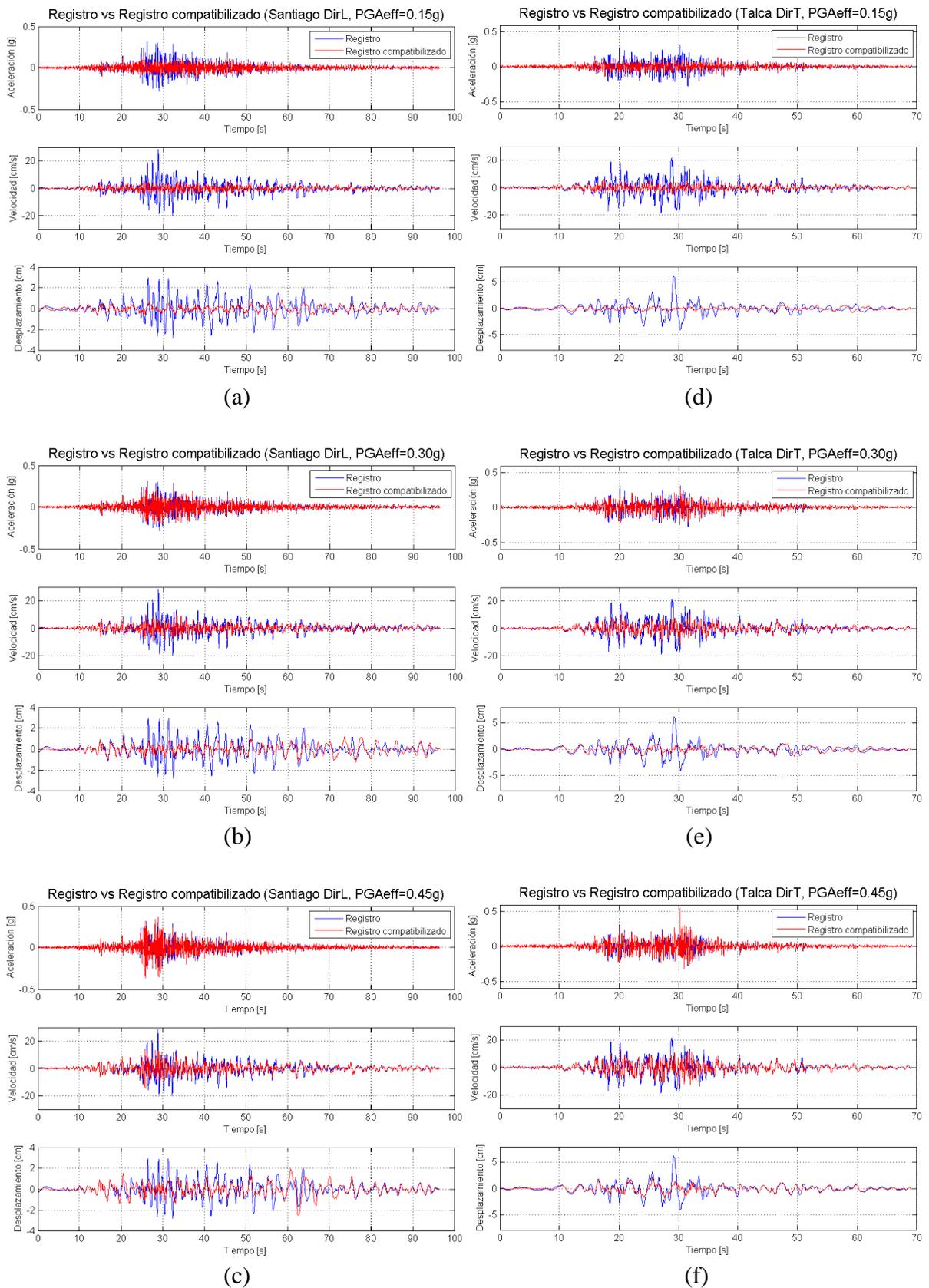
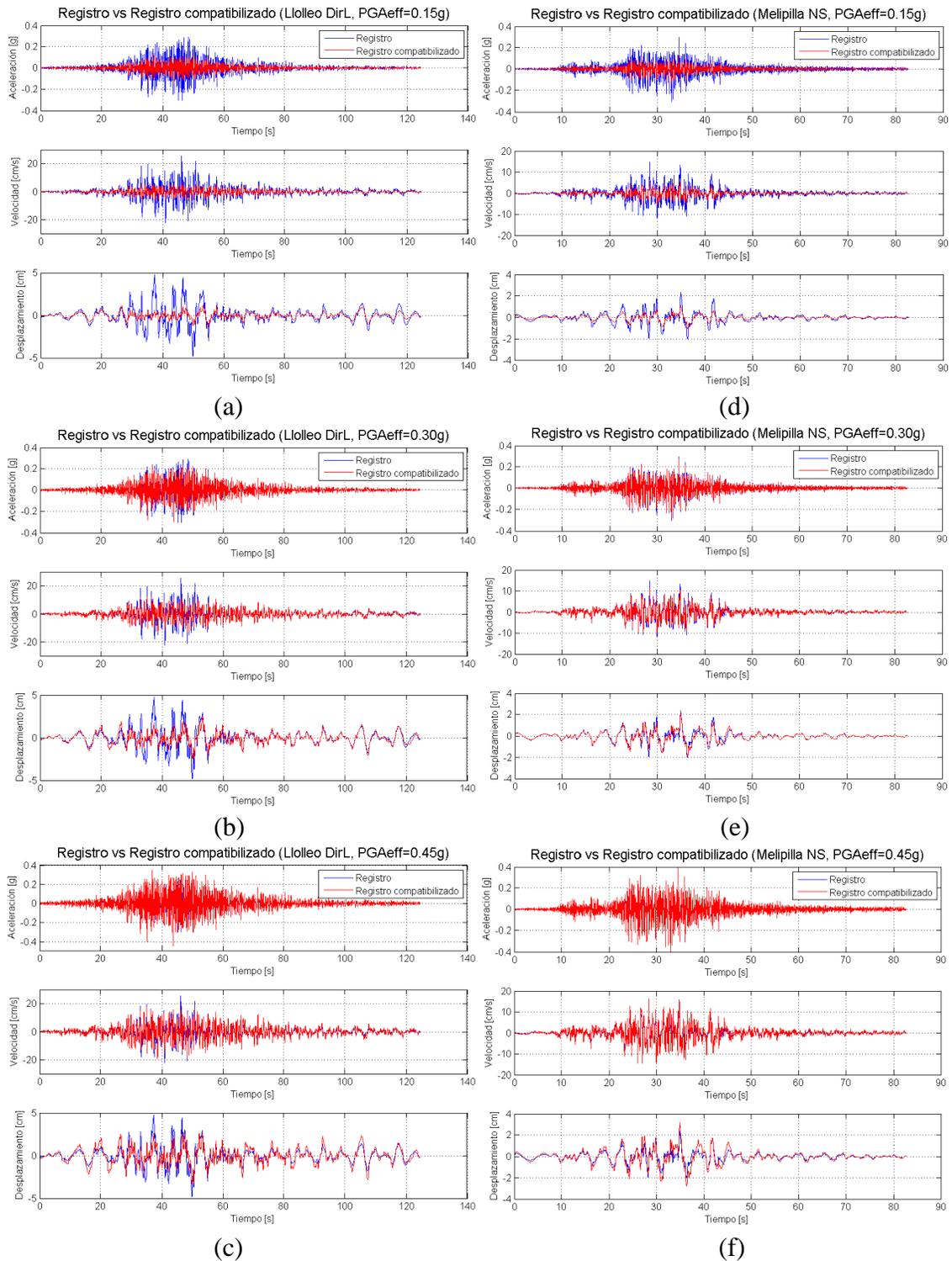


Figura B.3: Series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento para registros de Llolleo DirL (izquierda) y Melipilla NS (Derecha), compatibilizados al espectro con dos Peaks a partir de amplificaciones.

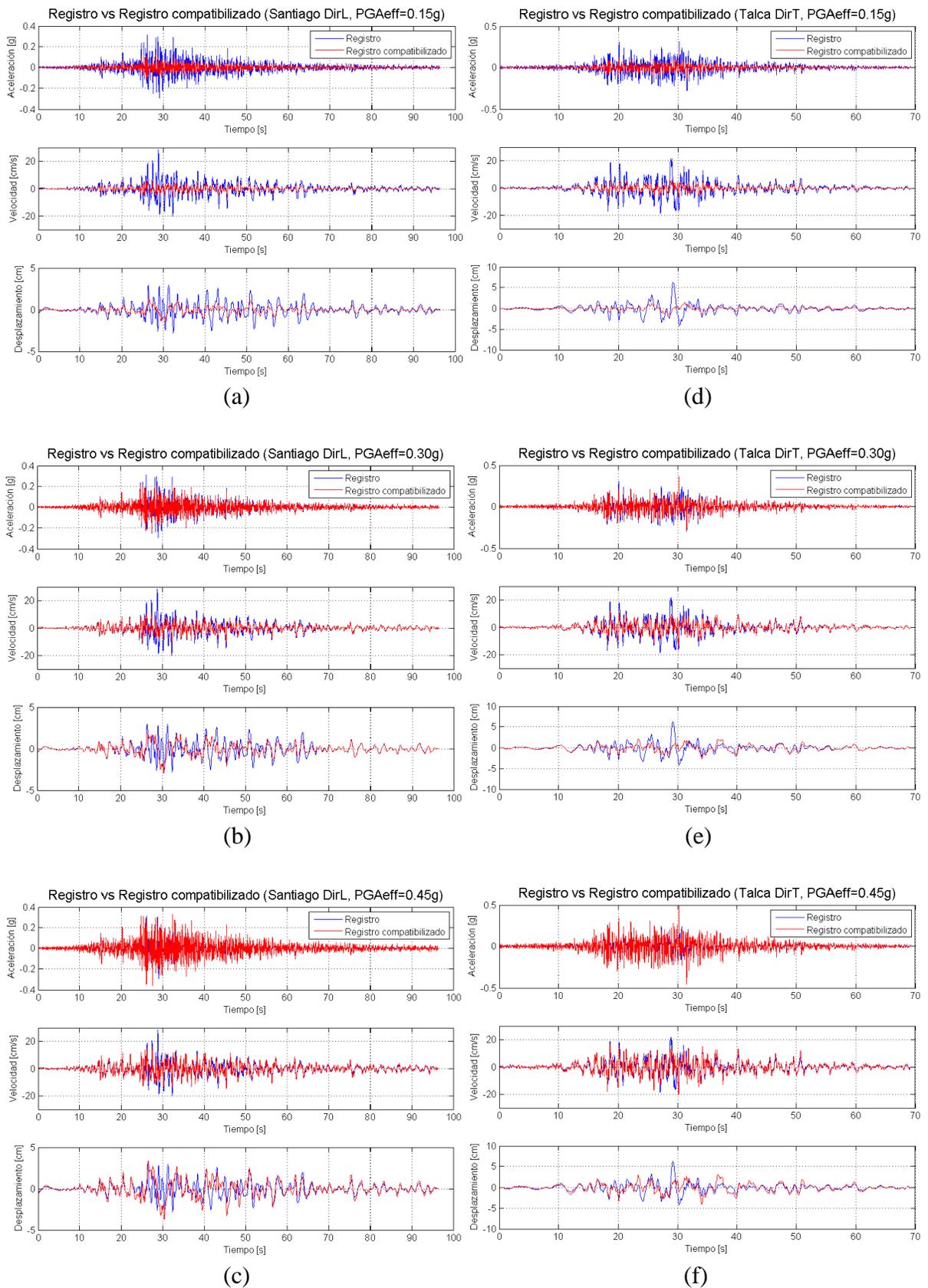


**Figura B.4:** Series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento para registros de Santiago DirL (izquierda) y Talca DirT (Derecha), compatibilizados al espectro con dos Peaks a partir de amplificaciones.

### B.3. AMPLIFICACIONES PARA ESPECTRO CON DOS PEAKS CON UN 20% DE ERROR Y ESCALADO A PGA DE TARGET



**Figura B.5:** Series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento para registros de Llolleo DirL (izquierda) y Melipilla NS (Derecha), compatibilizados al espectro con dos Peaks con error y escalado a partir de amplificaciones.



**Figura B.6:** Series de tiempo de aceleración, velocidad y desplazamiento para registros de Santiago DirL (izquierda) y Talca DirT (Derecha), compatibilizados al espectro con dos Peaks con error y escalado a partir de amplificaciones.

# ANEXO C

## C.1. DISCRETIZACIÓN ESPECTROS PARA PGA NORMA

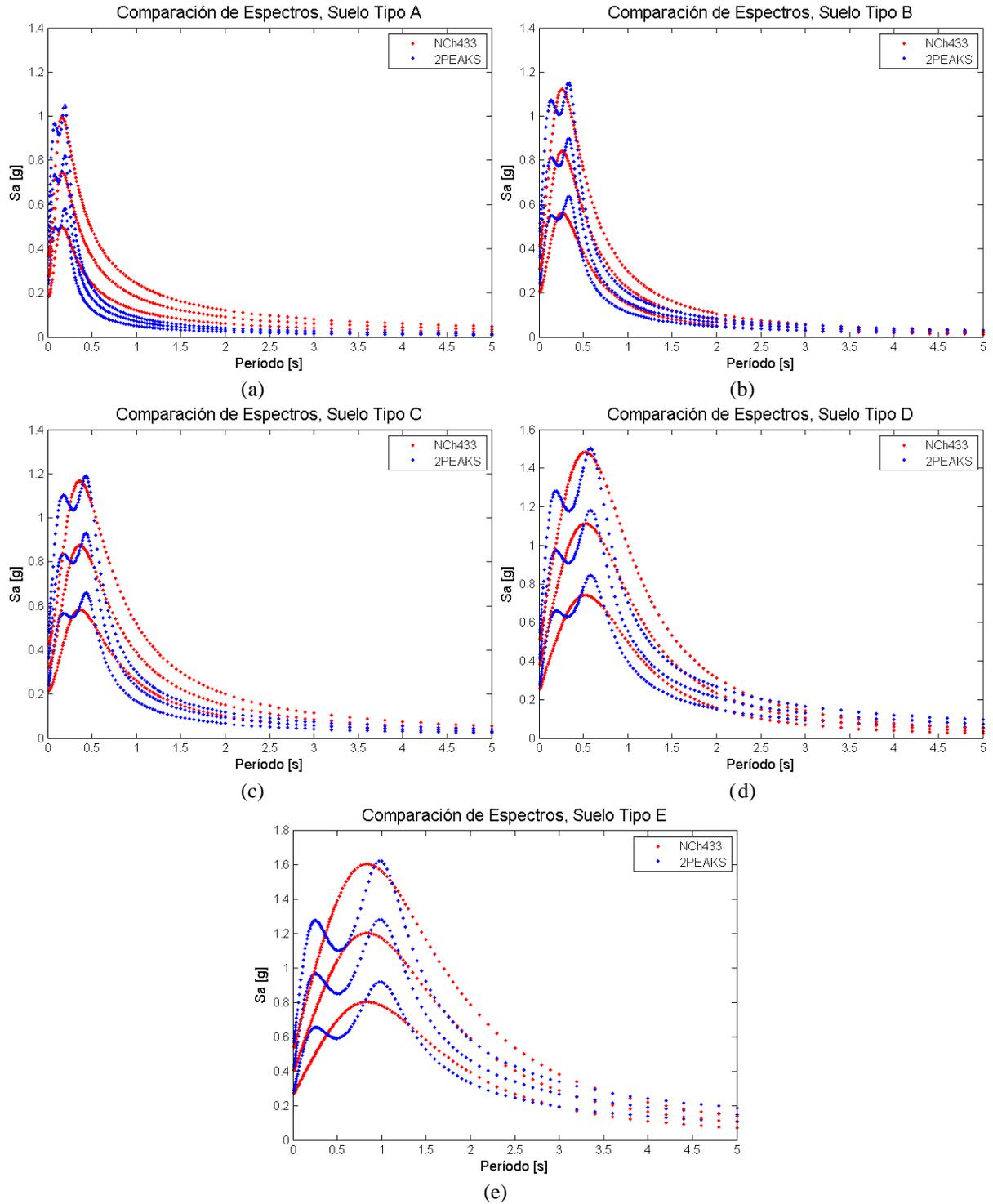
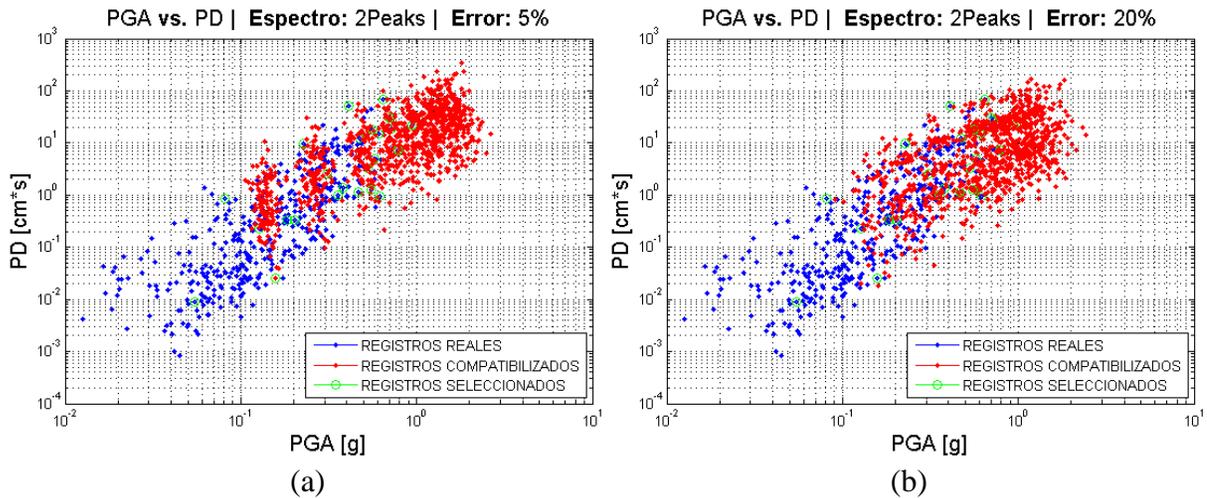


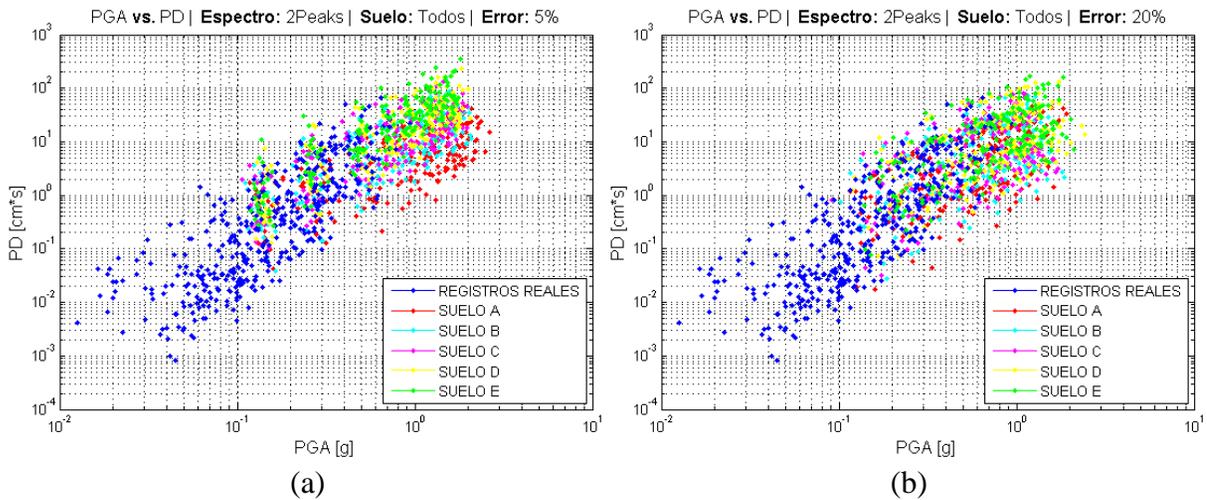
Figura C.1: Espectros utilizados como Target en forma discretizada.

# ANEXO D

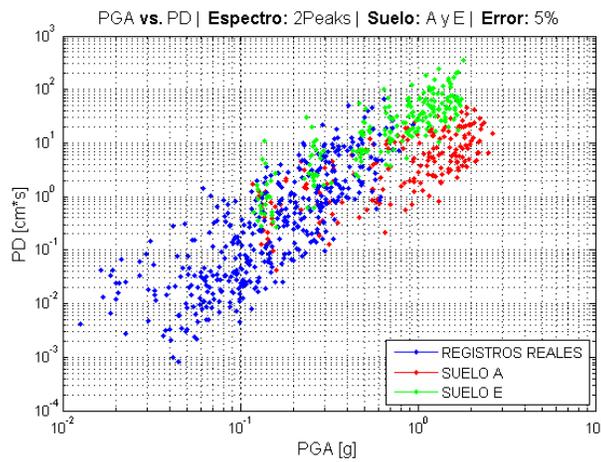
## D.1. ESPECTRO CON DOS PEAKS, PGA SELECCIONADOS



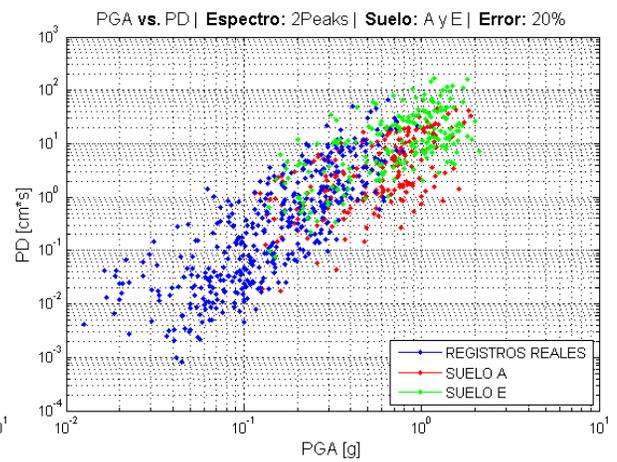
**Figura D.1:** Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro con dos Peaks para todos los tipos de Suelos de la Norma NCh433, utilizando varios niveles de PGA. (a) Registros compatibilizados para un 5% de error con respecto al Target. (b) Registros compatibilizados para un 20% de error con respecto al Target.



**Figura D.2:** Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro con dos Peaks para todos los tipos de Suelos de la Norma NCh433.

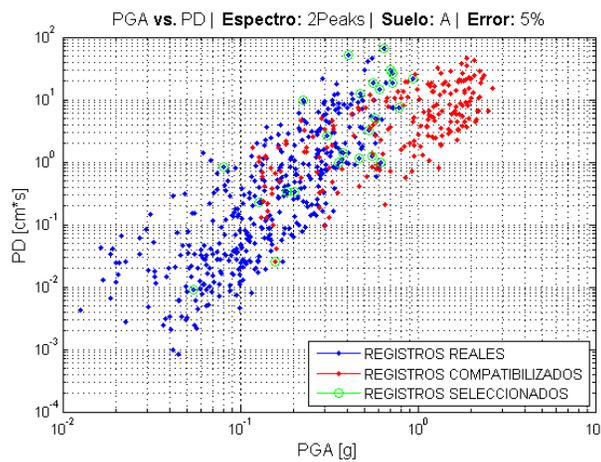


(a)

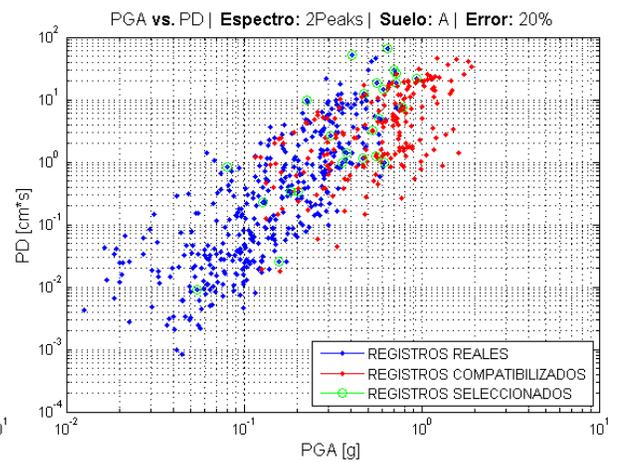


(b)

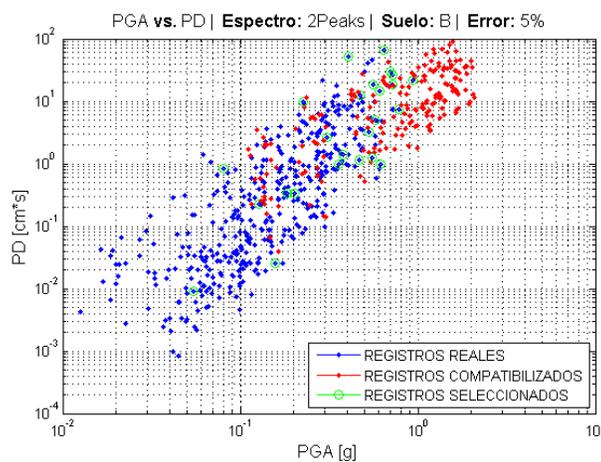
**Figura D.3:** Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro con dos Peaks para Suelo tipo A y E.



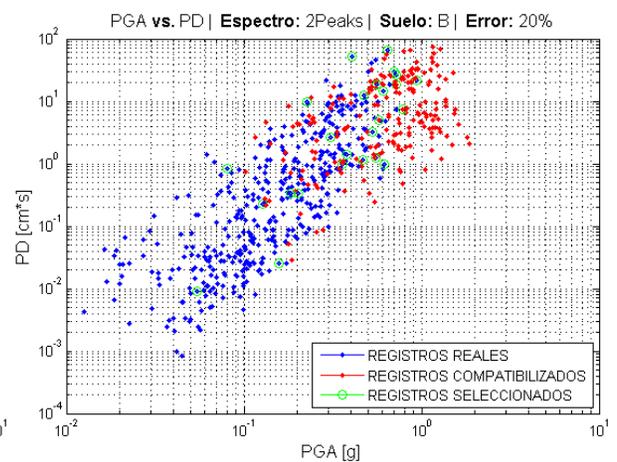
(a)



(f)



(b)



(g)

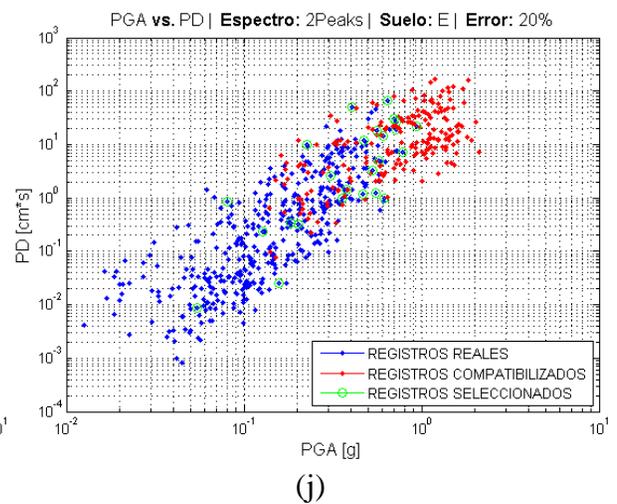
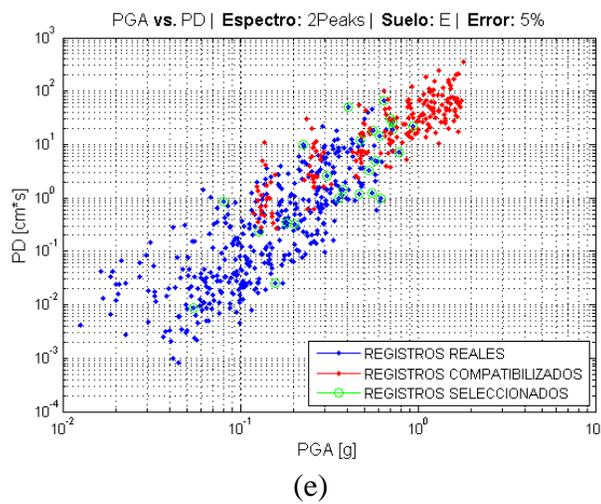
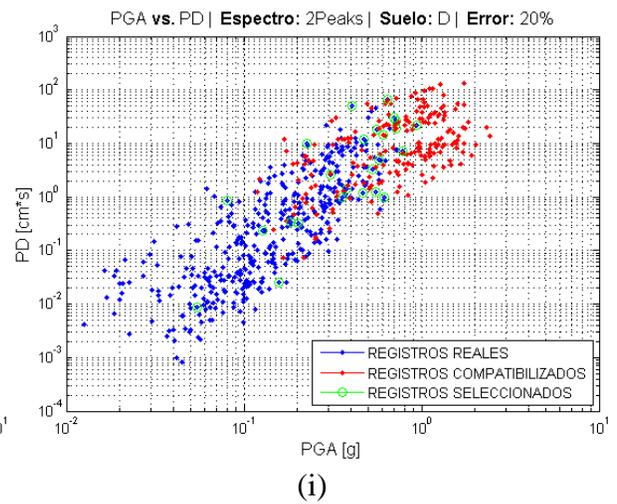
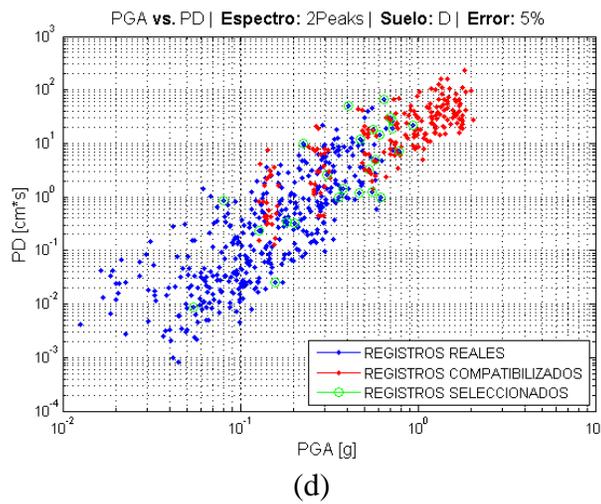
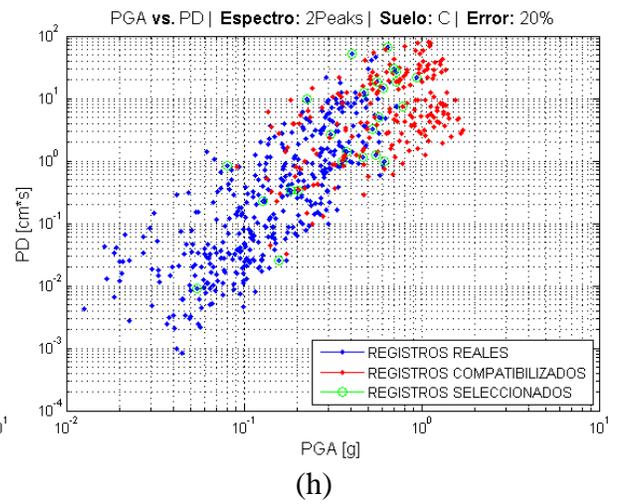
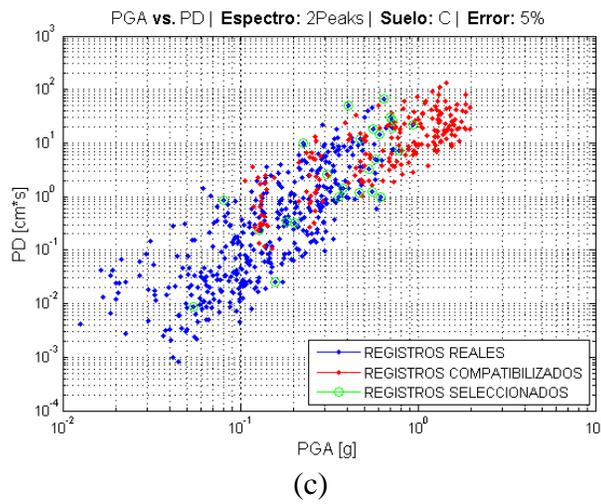
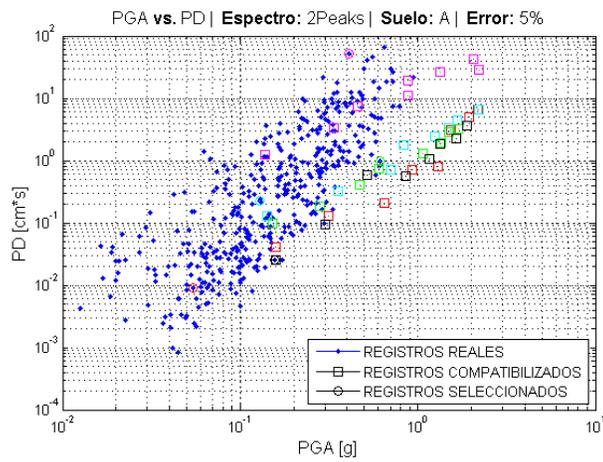
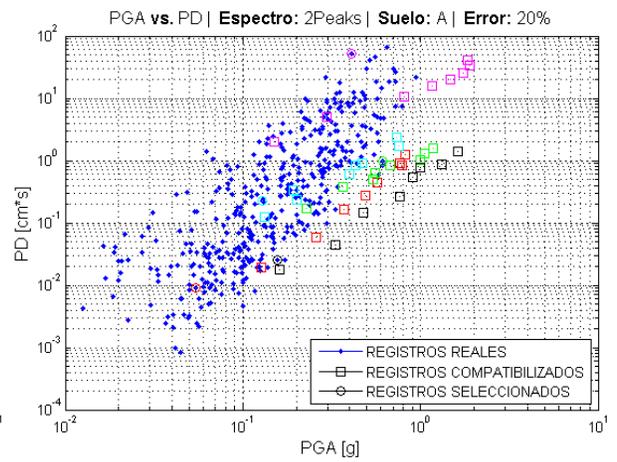


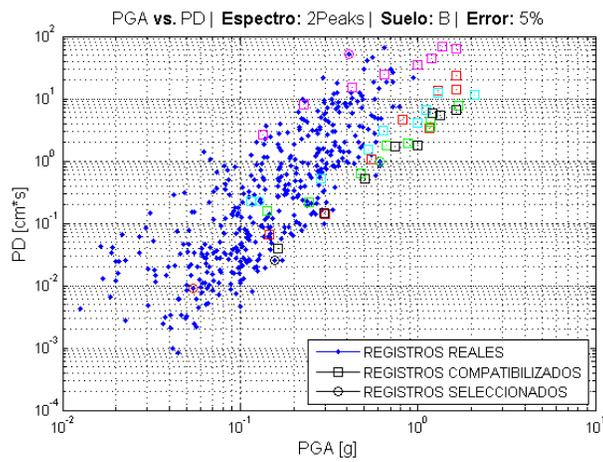
Figura D.4: Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro con dos Peaks para cada tipo de Suelo.



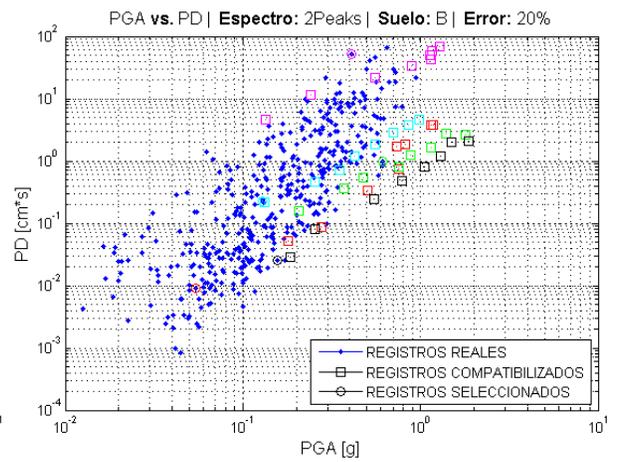
(a)



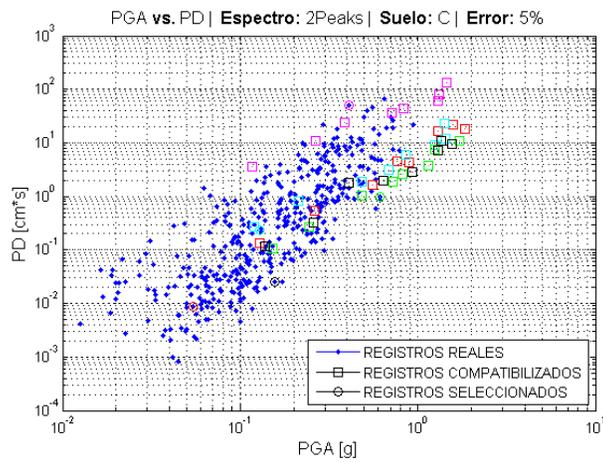
(f)



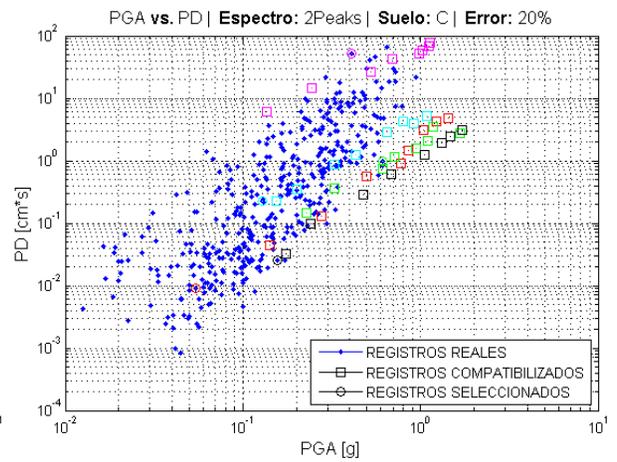
(b)



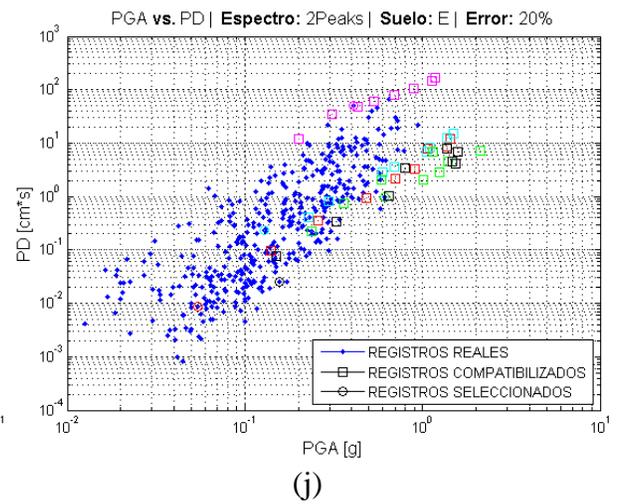
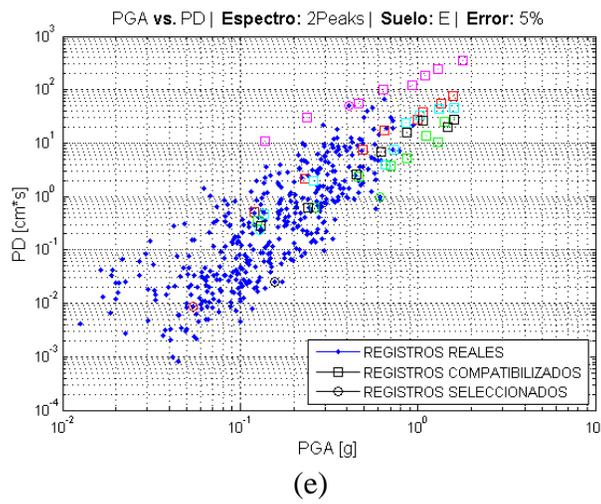
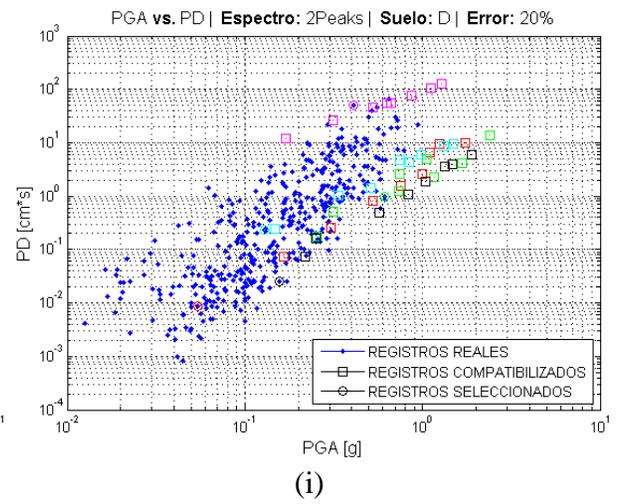
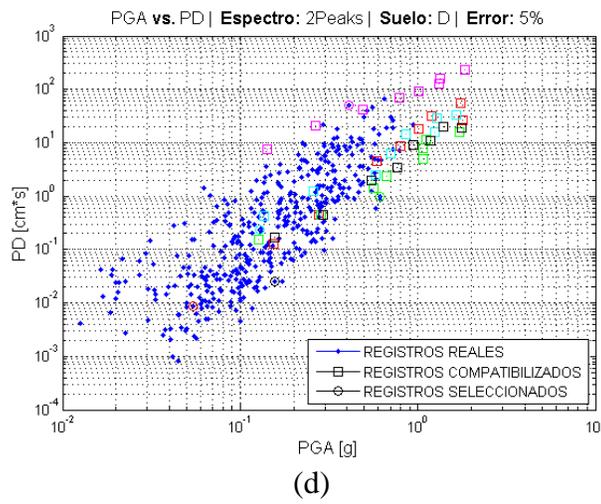
(g)



(c)

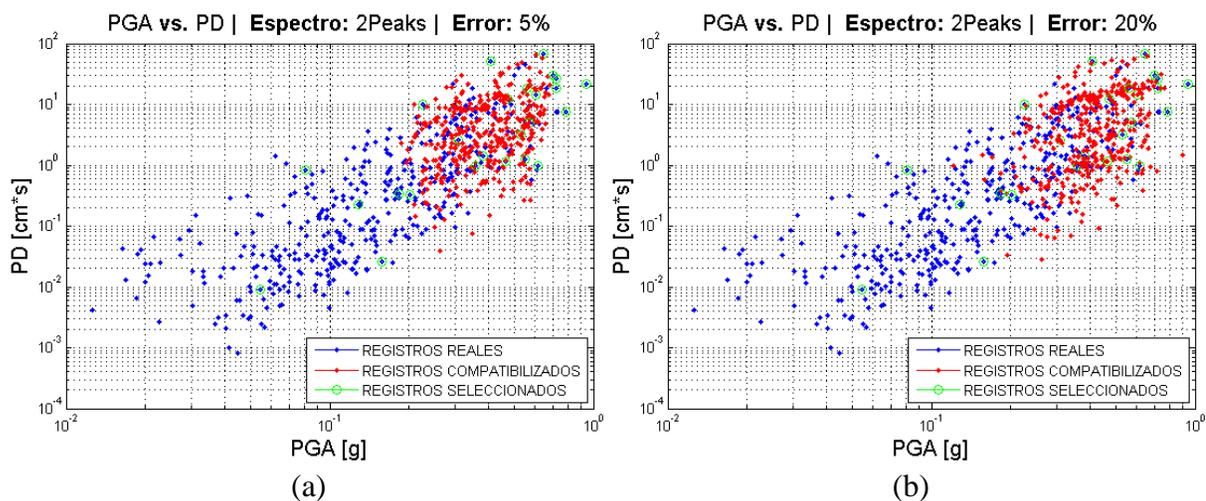


(h)

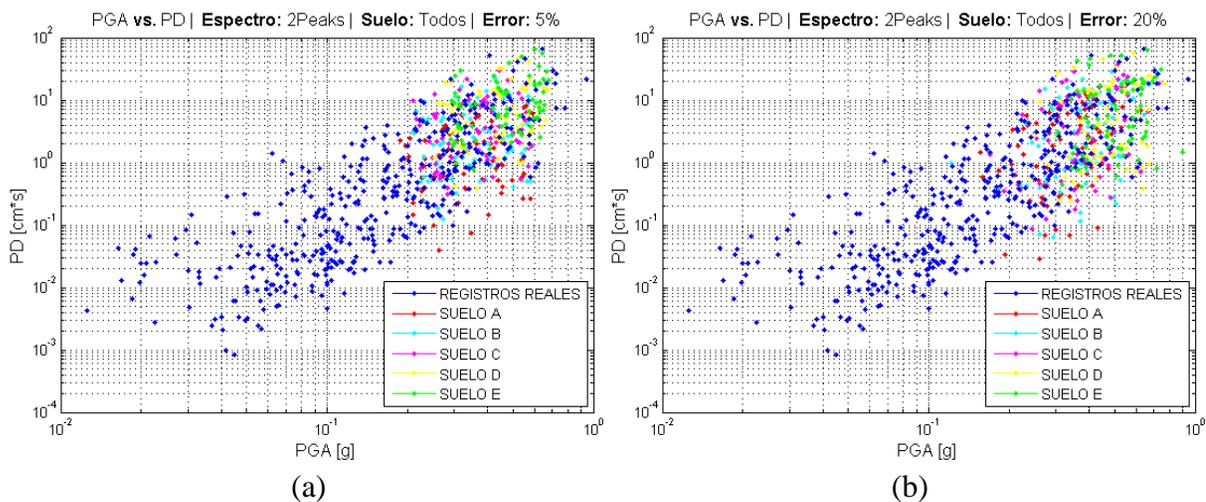


**Figura D.5:** Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro con dos Peaks para registros específicos.

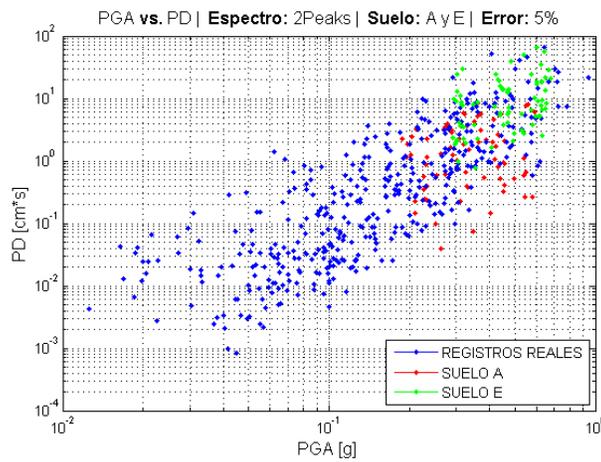
## D.2. ESPECTRO CON DOS PEAKS, A<sub>0</sub> SELECCIONADOS



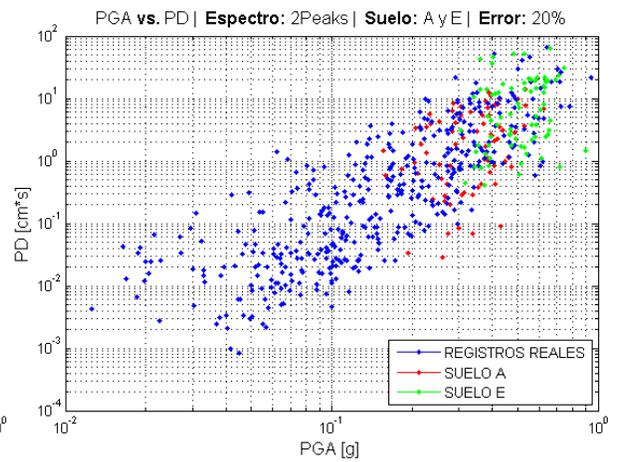
**Figura D.6:** Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro con dos Peaks para todos los tipos de Suelos de la Norma NCh433, utilizando niveles de aceleración efectiva máxima. (a) Registros compatibilizados para un 5% de error con respecto al Target. (b) Registros compatibilizados para un 20% de error con respecto al Target.



**Figura D.7:** Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro con dos Peaks para todos los tipos de Suelos de la Norma NCh433, utilizando niveles de aceleración efectiva máxima.

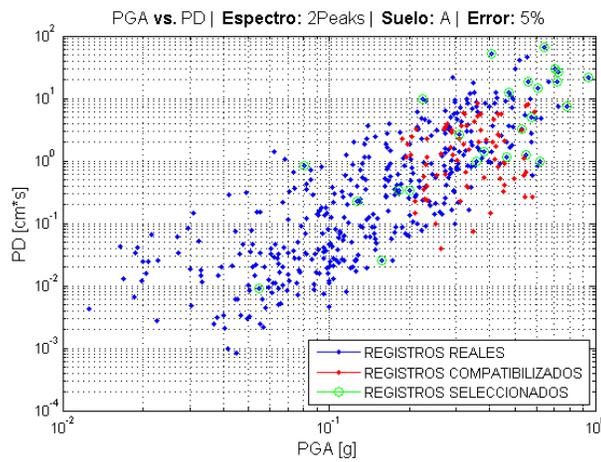


(a)

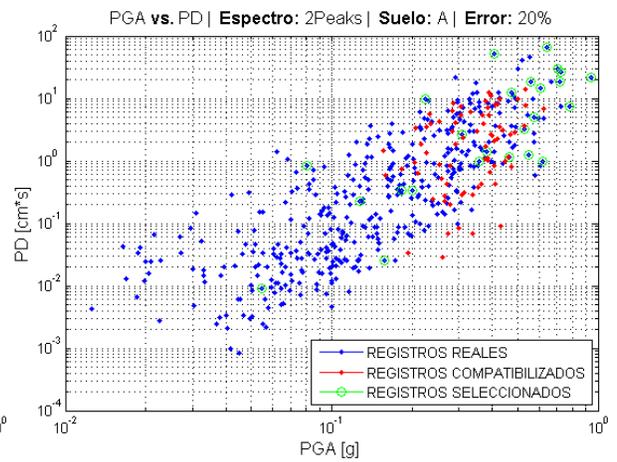


(b)

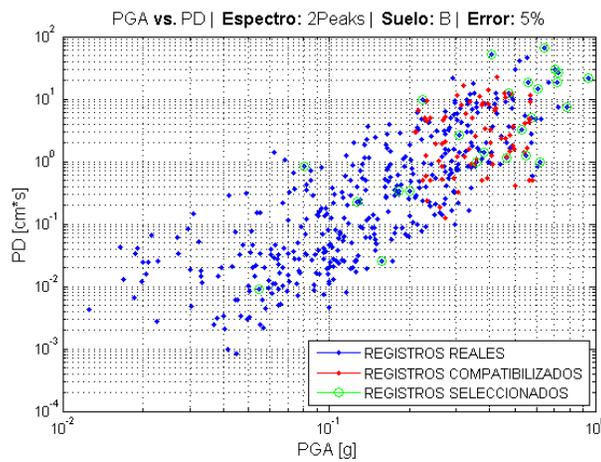
**Figura D.8:** Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro con dos Peaks para Suelos tipo A y E, utilizando niveles de aceleración efectiva máxima.



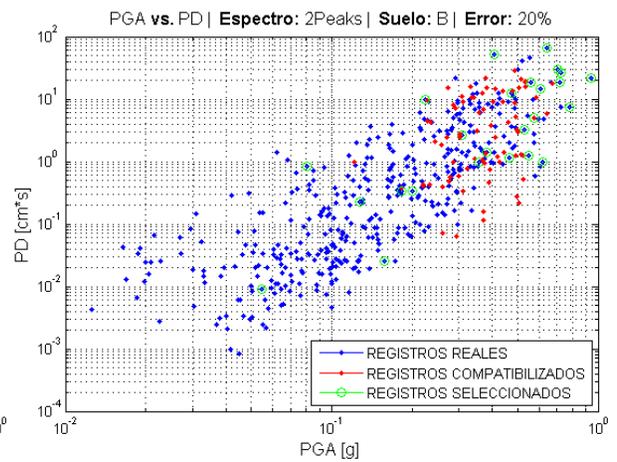
(a)



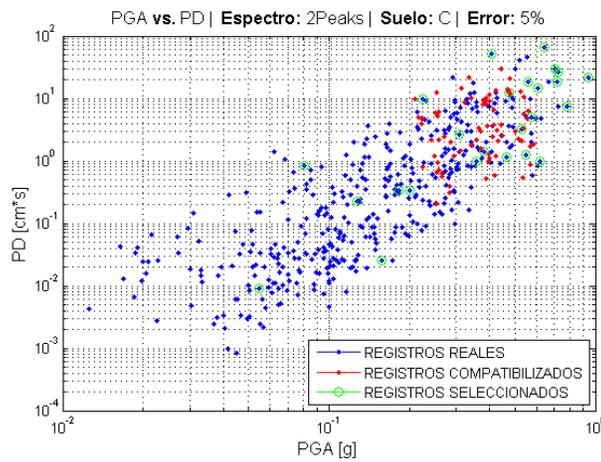
(f)



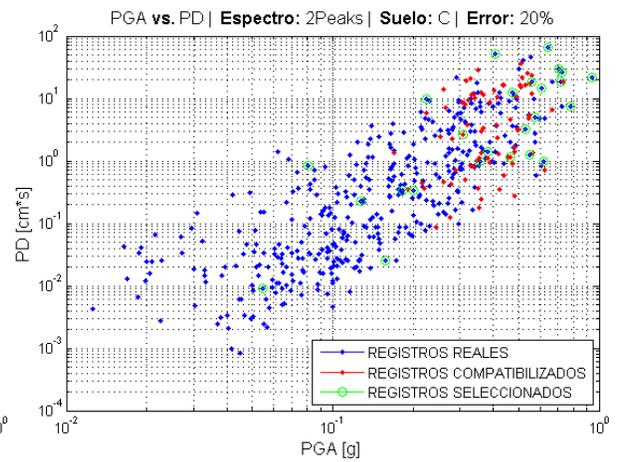
(b)



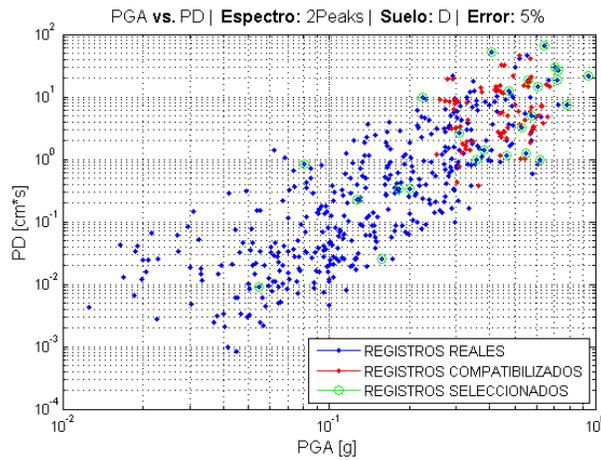
(g)



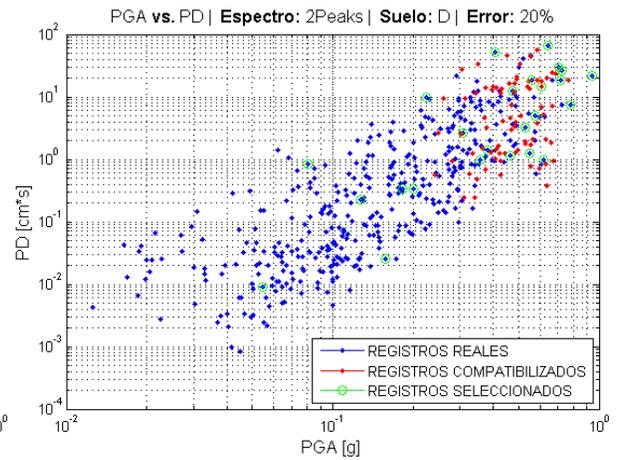
(c)



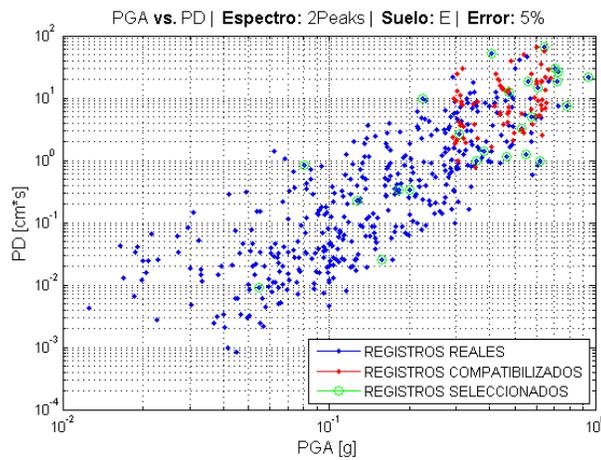
(h)



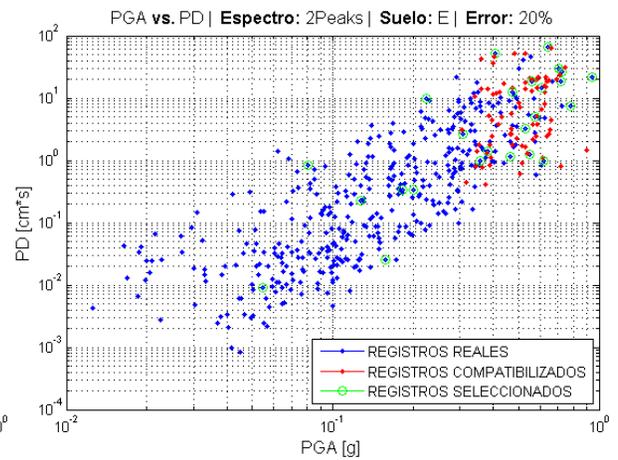
(d)



(i)

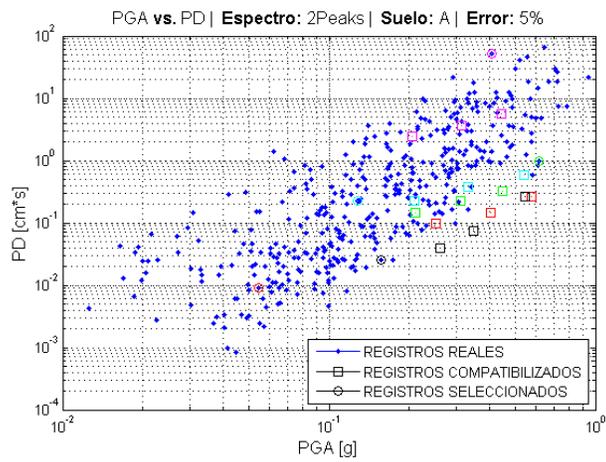


(e)

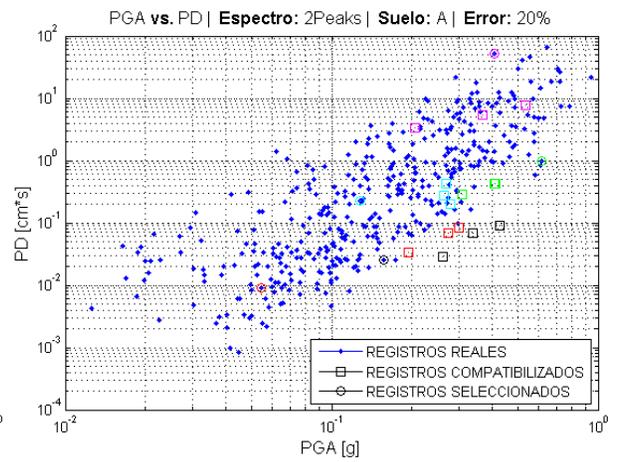


(j)

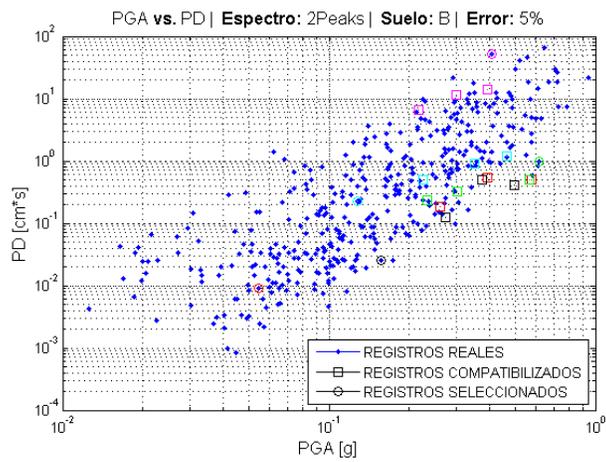
**Figura D.9:** Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro con dos Peaks para cada tipo de Suelo, utilizando niveles de aceleración efectiva máxima.



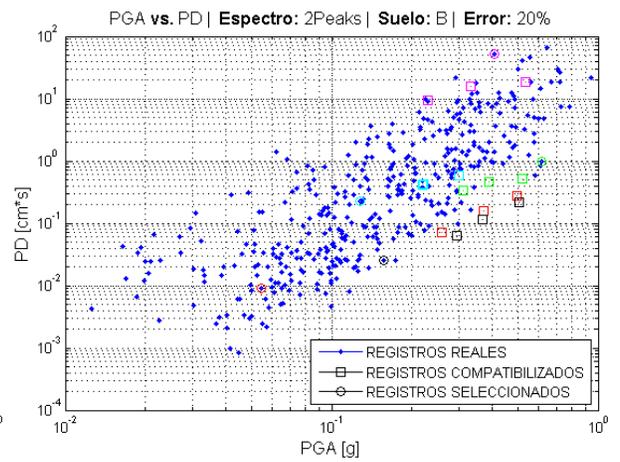
(a)



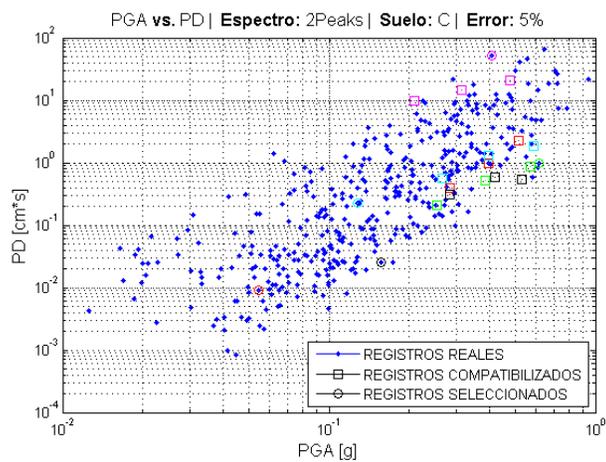
(f)



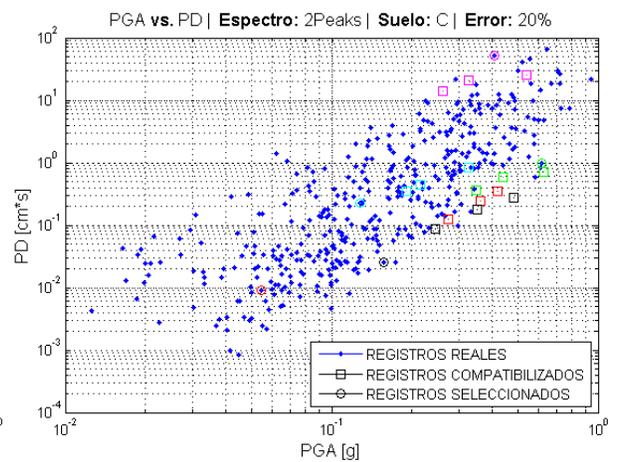
(b)



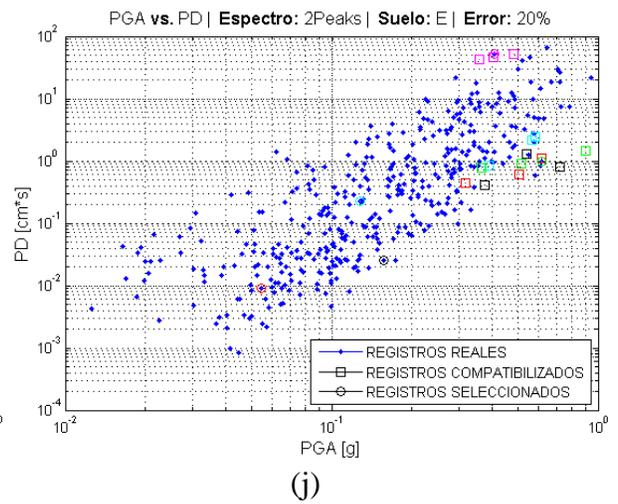
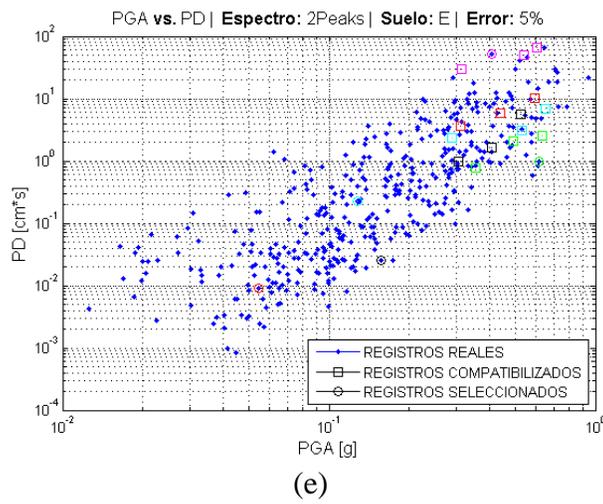
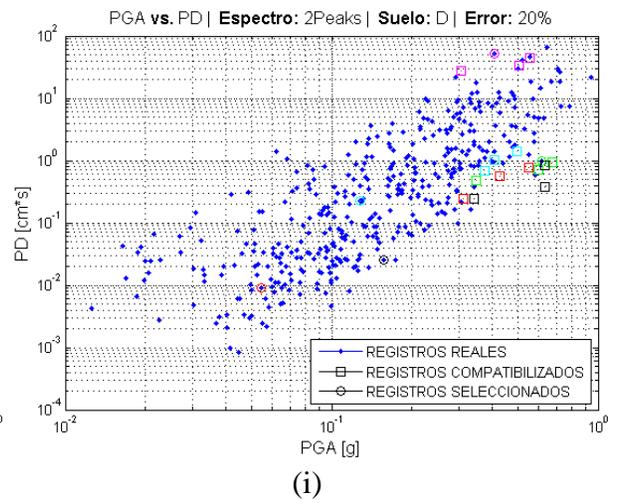
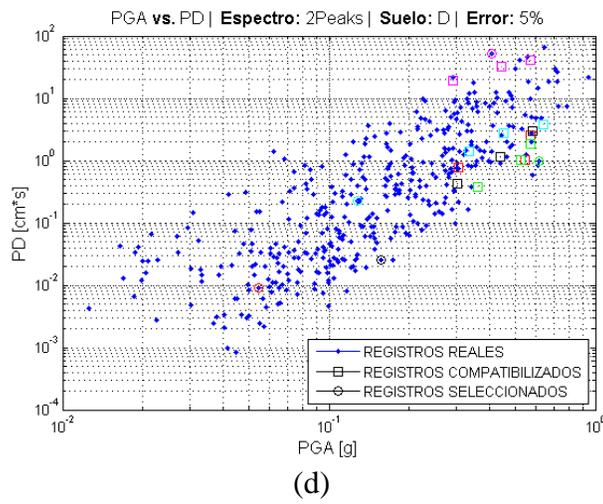
(g)



(c)



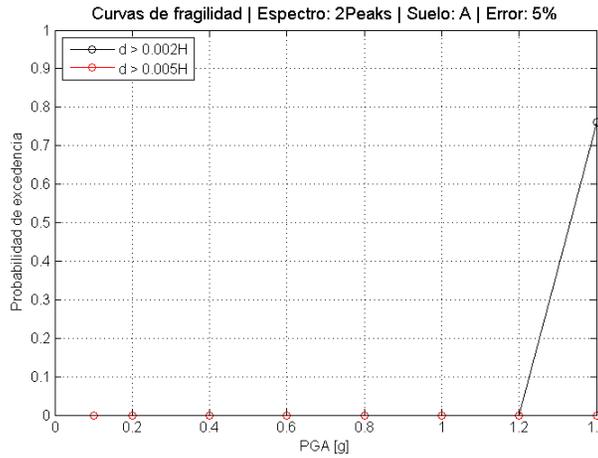
(h)



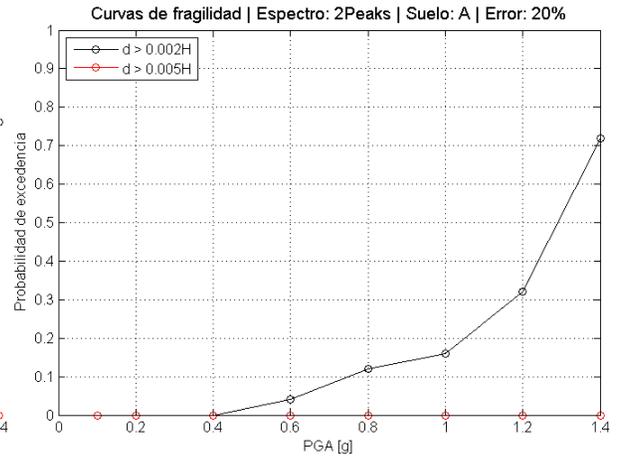
**Figura D.10:** Potencial Destructivo de registros compatibilizados al espectro con dos Peaks para registros específicos, utilizando niveles de aceleración efectiva máxima.

# ANEXO E

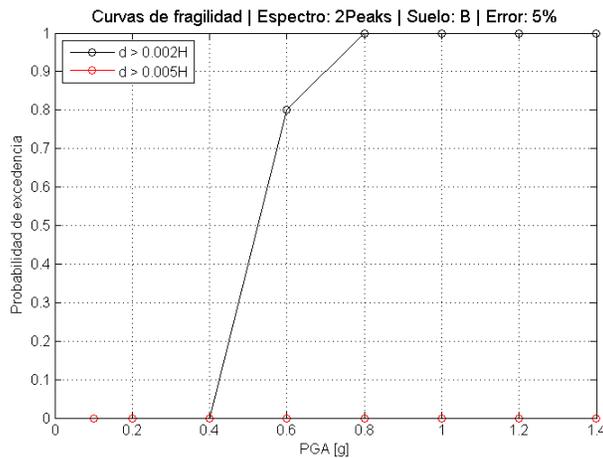
## E.1. CURVAS DE FRAGILIDAD, DOS PEAKS, PGA SELECCIONADOS



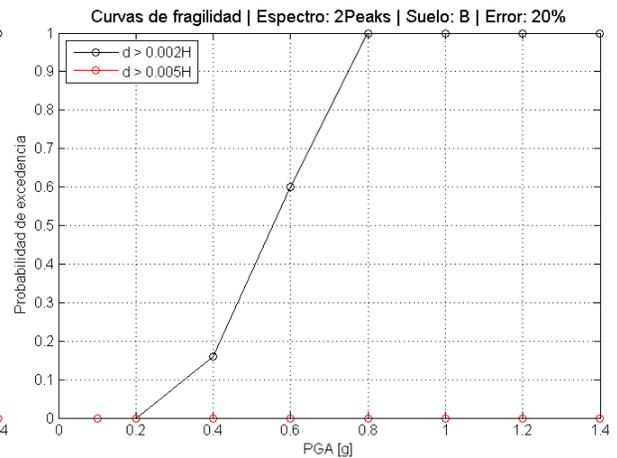
(a)



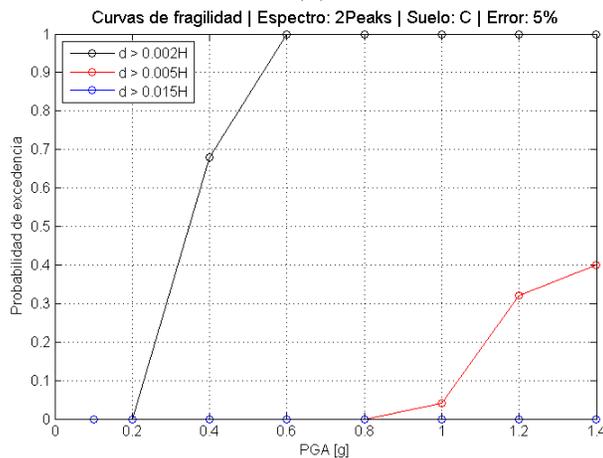
(f)



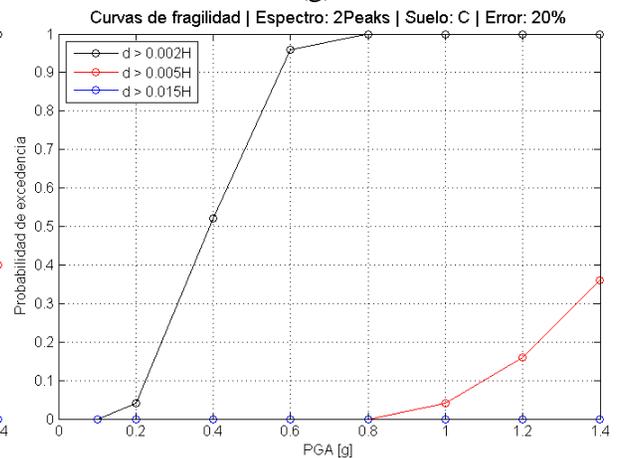
(b)



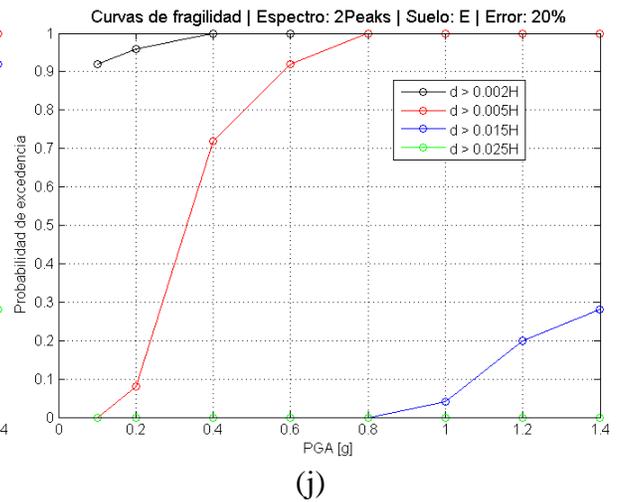
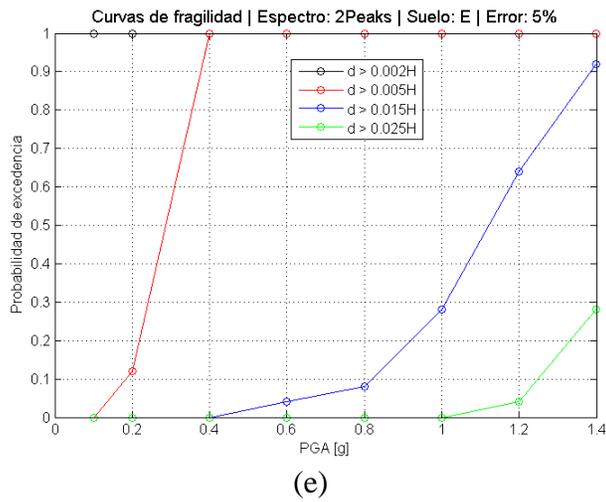
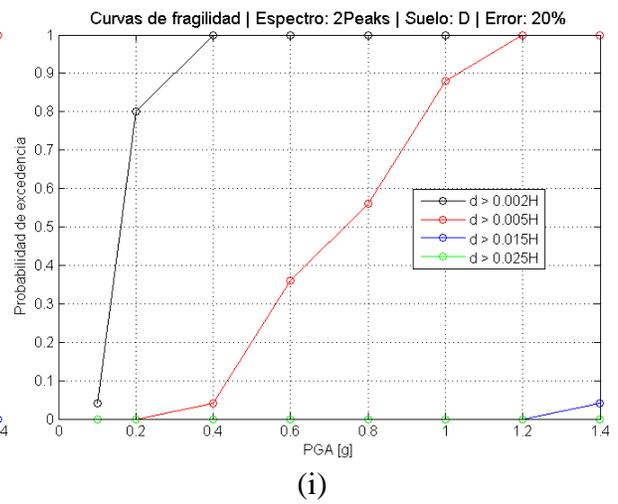
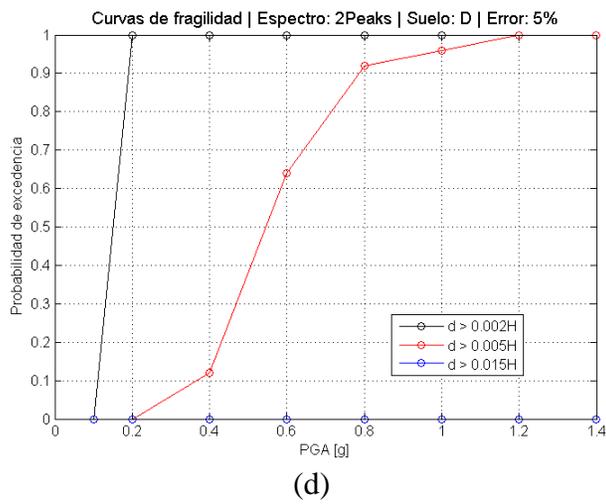
(g)



(c)

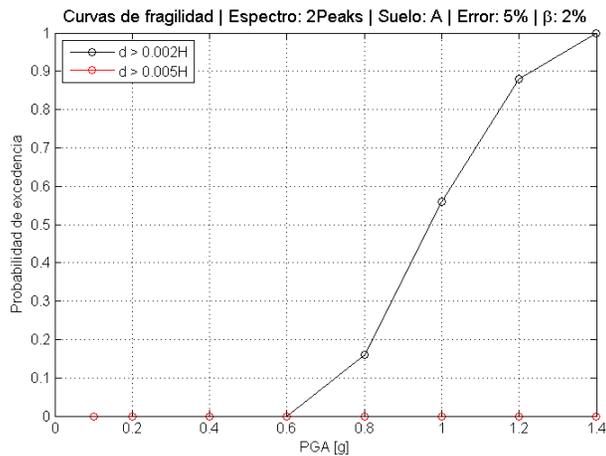


(h)

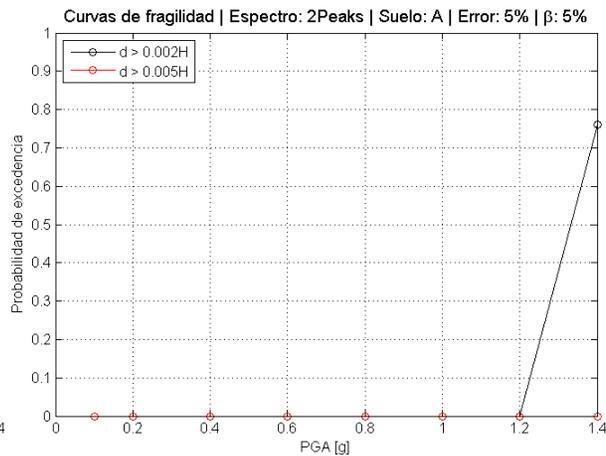


**Figura E.1:** Curvas de Fragilidad para los registros compatibilizados al espectro con dos Peaks para cada tipo de Suelo de la Norma NCh433, utilizando varios niveles de PGA.

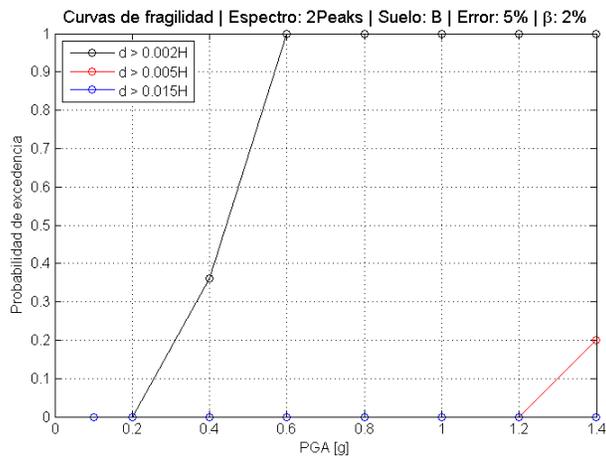
## E.2. CURVAS DE FRAGILIDAD CONSIDERANDO UNA RAZÓN DE AMORTIGUAMIENTO $\beta$ DE 2% y 5% (ESPECTRO CON 2 PEAKS)



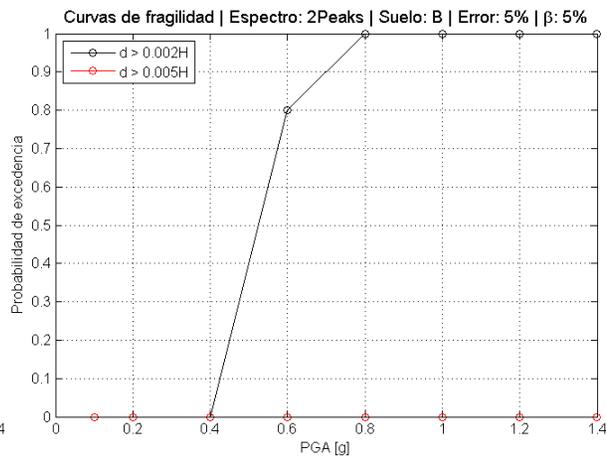
(a)



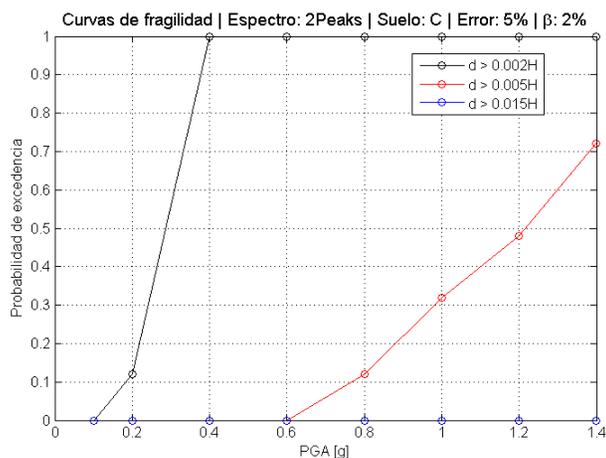
(f)



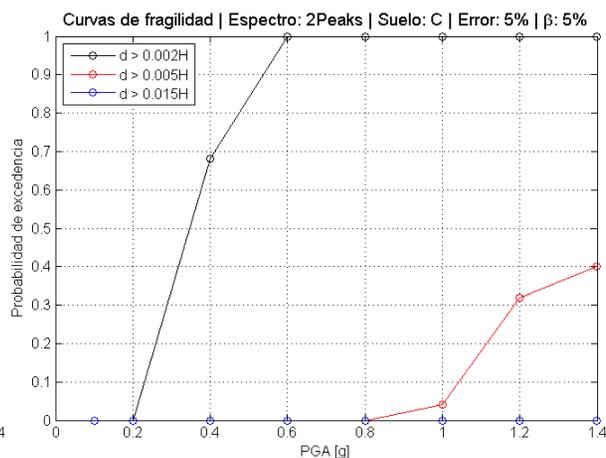
(b)



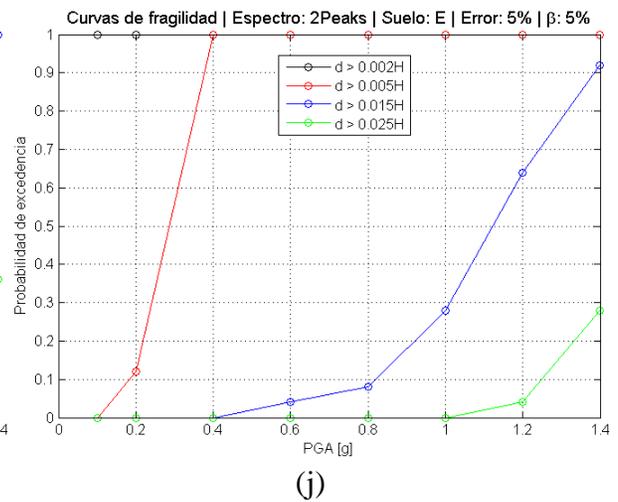
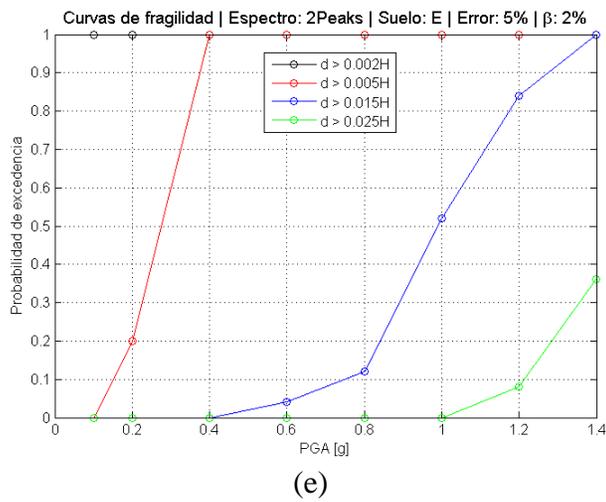
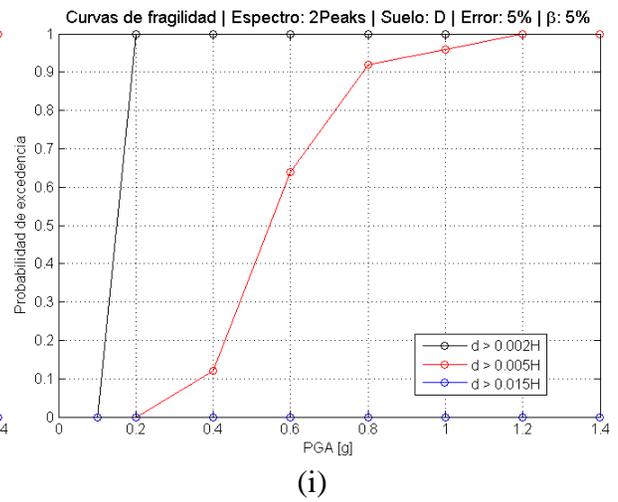
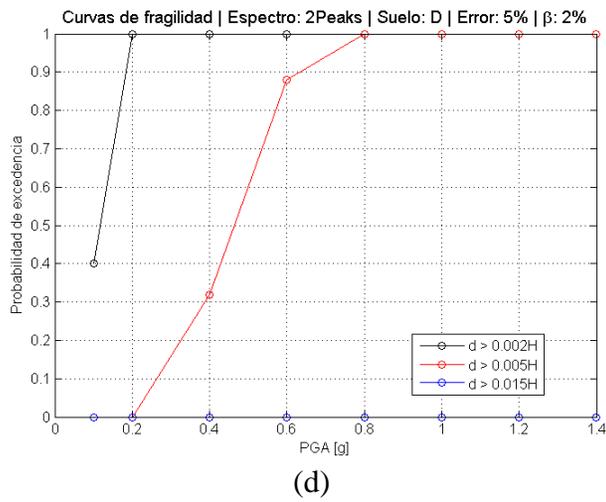
(g)



(c)



(h)



**Figura E.2:** Curvas de Fragilidad para los registros compatibilizados al espectro con 2 Peaks para cada tipo de Suelo de la Norma NCh433, utilizando varios niveles de PGA, considerando una razón de amortiguamiento de 2% y 5%.

# ANEXO F

## F.1. RESAMPLE DE REGISTROS PARA DISMINUIR TIEMPO DE EJECUCIÓN DEL PROGRAMA

El programa de compatibilización espectral implementado en Matlab, tiene la desventaja de tomar una cantidad de tiempo considerable para realizar la compatibilización del registro a un Target. Esto se puede controlar disminuyendo las frecuencias del target, para que la compatibilización no evalúe demasiadas frecuencias del target, y así poder centrarse en los puntos de mayor interés. Otra forma de disminuir el tiempo de ejecución del programa, es realizar menos iteraciones en cada paso de ajuste, lo cual puede afectar a que la compatibilización no se realice de manera correcta. Y por último, se puede remuestrear el registro que se quiere compatibilizar a un target (resample), de manera que este registro contenga menos puntos para ser compatibilizados, en comparación con el original que puede tener el doble o triple de puntos que el registro con resample.

Teniendo en consideración lo anterior, se realiza un resmuestreo a 50 muestras por segundo de los registros de Concepción Centro y Concepción San Pedro en su dirección longitudinal, los cuales tienen una frecuencia de muestreo original de 200 y 100 muestras por segundos respectivamente.

A continuación se presentan los resultados de las comparaciones para los registros reales y los registros remuestreados a 50 muestras por segundo.

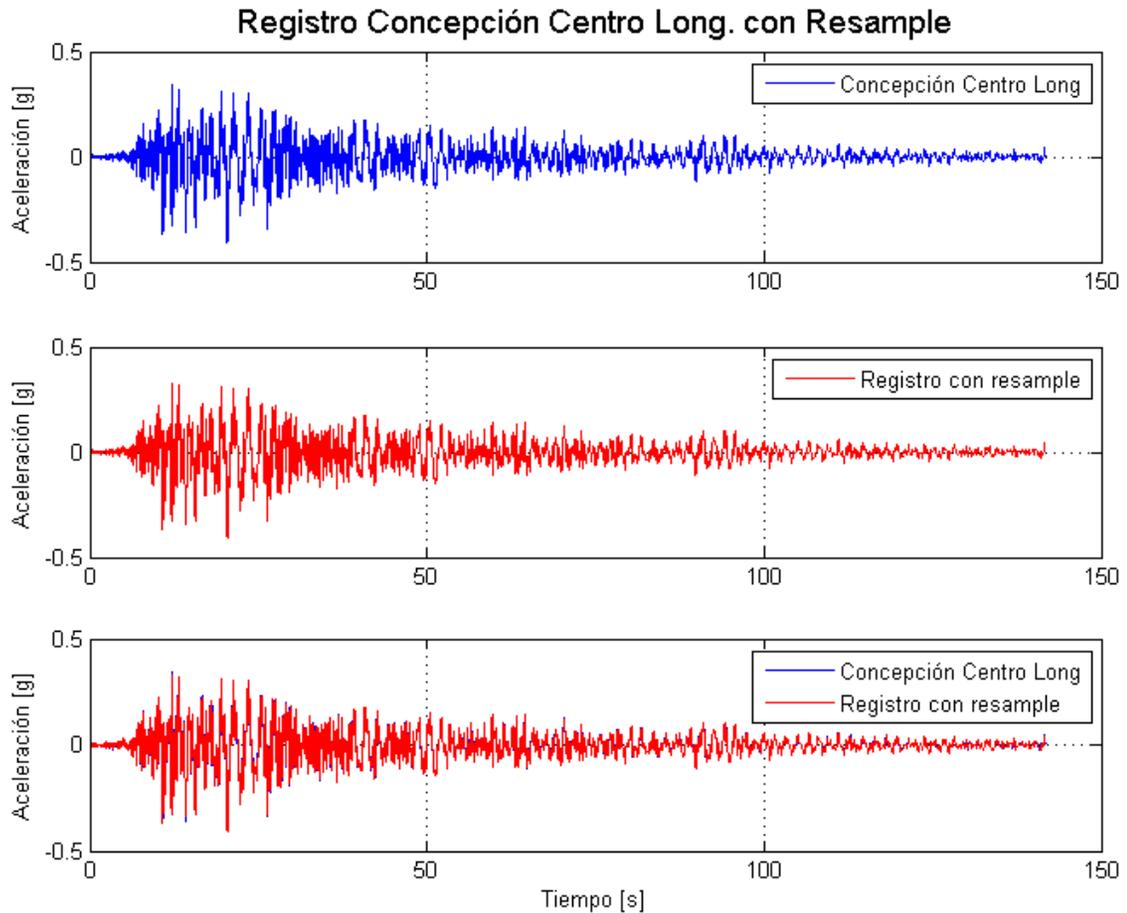
### F.1.1. Concepción Centro Longitudinal

La comparación de propiedades entre el registro de Concepción Centro longitudinal y el registro con resample se muestra en la Tabla F.1.

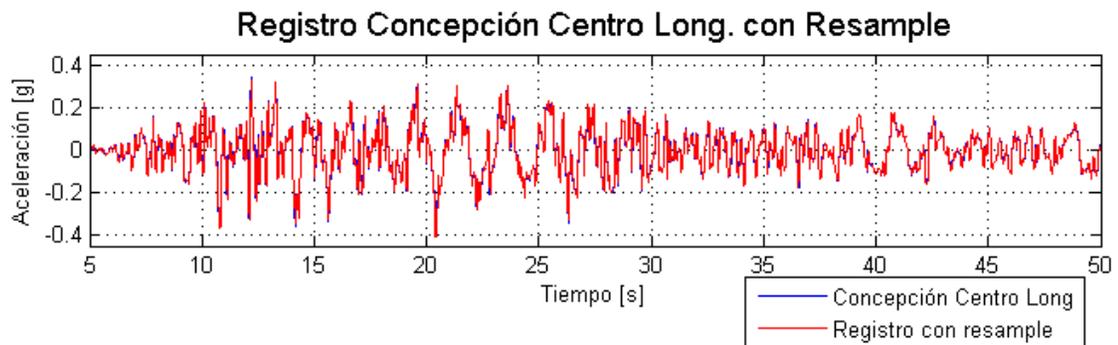
Tabla F.1: Comparación de propiedades entre Registro de Concepción Centro long. Real y Registro con Resample.

<b>Parámetro</b>	<b>Registro Real</b>	<b>Registro con Resample</b>
PGA [g]	0.4083	0.4075
IA [cm/s]	910.269	909.991
IH [cm]	188.804	180.177
PD [cm*s]	51.088	52.460

En la Figura F.1 se observa el registro de Concepción Centro Longitudinal (en azul), el registro con resample (color rojo), y los registros superpuestos para poder ver la diferencia entre registros. Una comparación en un rango menor de tiempo se muestra en la Figura F.2, en la cual es posible observar que los registros son similares.



**Figura F.1:** Registro de Concepción Centro Longitudinal, Registro con resample y registros superpuestos.



**Figura F.2:** Registros superpuestos para un rango de tiempo menor.

### F.1.2. Concepción San Pedro Longitudinal

La comparación de propiedades entre el registro de Concepción San Pedro longitudinal y el registro con resample se muestra en la Tabla F.2.

Tabla F.2: Comparación de propiedades entre Registro de Concepción San Pedro long. Real y Registro con Resample.

Parámetro	Registro Real	Registro con Resample
PGA [g]	0.6066	0.6065
IA [cm/s]	1473.965	1473.827
IH [cm]	142.716	141.988
PD [cm*s]	14.579	14.957

En la Figura F.3 se observa el registro de Concepción San Pedro Longitudinal (en azul), el registro con resample (color rojo), y los registros superpuestos para poder apreciar la diferencia entre registros. Una comparación en un rango menor de tiempo se muestra en la Figura F.4, en la cual es posible observar que los registros son similares.

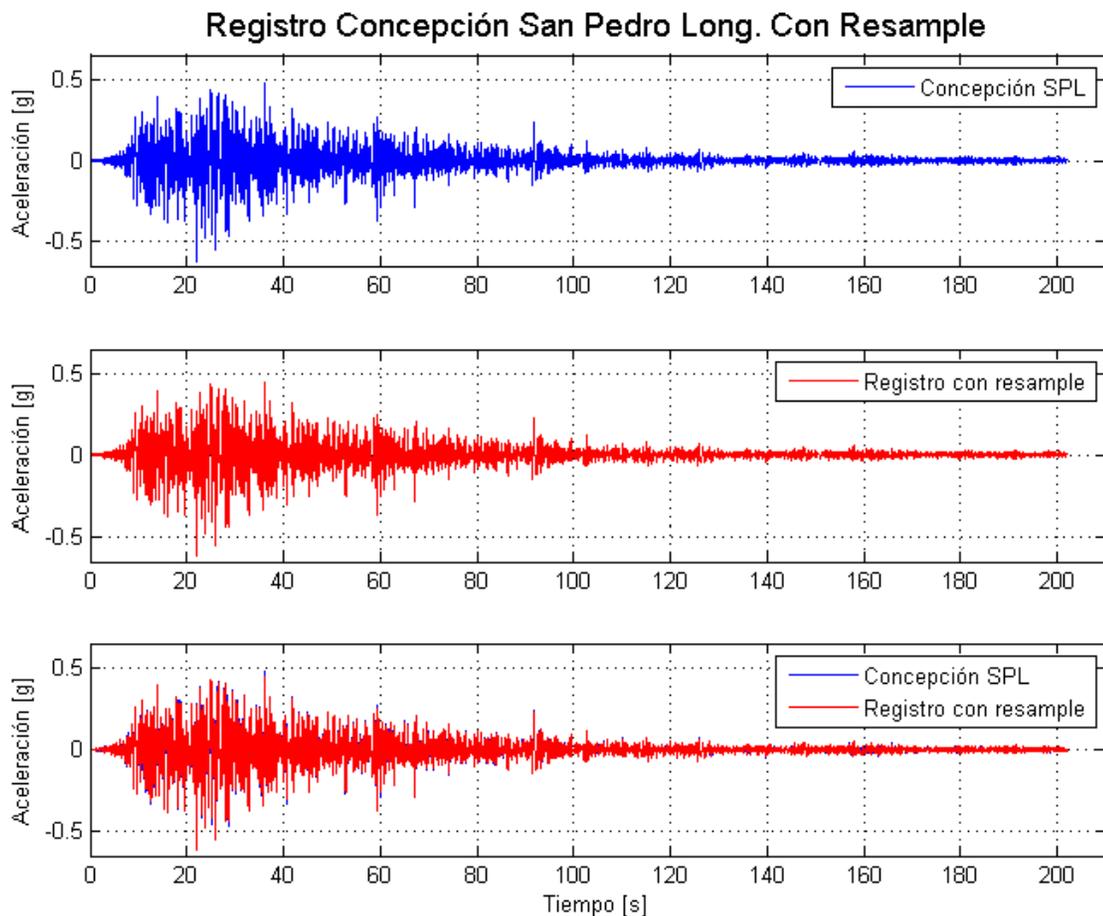
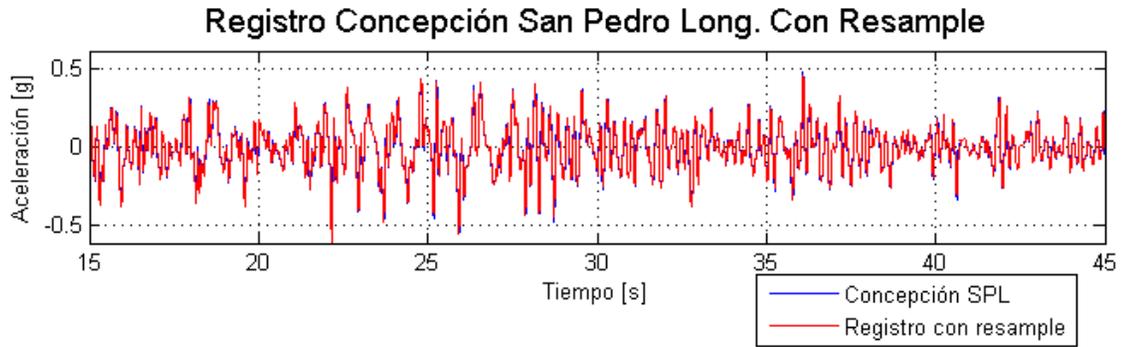


Figura F.3: Registro de Concepción San Pedro Longitudinal, Registro con resample y registros superpuestos.



**Figura F.4:** Registros superpuestos para un rango de tiempo menor.

### F.1.3. Variación de tiempo

Utilizando el espectro de la Norma chilena NCh 433 Of. 96 como Target, para un suelo tipo E, se realiza la compatibilización espectral para el registro de Concepción Centro Longitudinal, utilizando el registro compatibilizado sin resample del capítulo 3, en la sección 3.4 (subsección 3.4.3.), y el registro compatibilizado con resample. Las propiedades de los registros compatibilizados (Registros mod.) para el registro real y el registro con resample, y el tiempo de ejecución del programa en realizar la compatibilización espectral, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla F.3: Comparación entre Registro compatibilizado de Concepción Centro long. Sin Resample y Registro compatibilizado con Resample

<b>Parámetro</b>	<b>Registro sin Resample</b>	<b>Registro con Resample</b>
PGA [g]	0.4775	0.4693
IA [cm/s]	1061.579	1043.665
IH [cm]	202.425	213.138
PD [cm*s]	57.637	59.760
Tiempo [min]	116.310	26.703

Como se puede observar en la Tabla F.3, el tiempo de ejecución del programa para el registro con resample (utilizando cuatro procesadores en un computador de gama media), es alrededor de 4 veces menor que el tiempo del registro real, debido a la cantidad de puntos de diferencia existentes entre cada registro. Sin embargo, las propiedades de los registros varían al realizar la modificación del registro original.

Por lo tanto, para registros con frecuencias de muestreo de 200 muestras por segundo, que podrían ser remuestreadas a 50 muestras por segundo, el tiempo de ejecución del programa disminuirá sustancialmente.