

## **REGIONALIZACIÓN Y SELECCIÓN DE REGISTROS SÍSMICOS PARA ANÁLISIS DINÁMICOS NO LINEALES DE RESPUESTA EN EL TIEMPO DE ESTRUCTURAS EN CHILE**

*E. Flores Sáez<sup>1</sup>, C. Oyarzo Vera<sup>2</sup>*

### **RESUMEN**

Chile es un país ubicado a lo largo de la interacción de las placas de Nazca y Sudamérica. Esta interacción genera zonas de subducción y eventos de gran magnitud ( $M_w > 8.0$ ) en las costas del país. En este trabajo se seleccionaron registros sísmicos (acelerogramas) de  $M_w > 6.5$ , de un universo de más de 3000 registros provenientes de distintas fuentes chilenas y extranjeras. Se seleccionaron eventos de tipo Interplaca, Intraplaca y Corticales, desde el año 1985 al 2015. Estos registros fueron sometidos a corrección de línea base y filtro pasa banda de tipo Butterworth. Además, se generaron espectros elásticos de diseño para las distintas zonas sísmicas y tipos de suelo C y D según la NCh 433 y Decreto Supremo 61. Estos fueron utilizados como espectros objetivos para el escalamiento del espectro de respuesta de cada registro sísmico seleccionado, utilizando un algoritmo de wavelets asistido por el software SeismoMatch. Se definen regiones sismotectónicas a lo largo del país mediante la evaluación del largo de ruptura de los mayores sismos en la historia. Además, se seleccionaron los mejores 9 registros para cada región propuesta y para las ciudades de Iquique, Coquimbo y Concepción. Estos registros se encuentran disponibles en OneDrive con información respecto a la fecha del evento, ubicación de epicentro y estación, profundidad, PGA, PGD, distancia a la ruptura, duración significativa, entre otros parámetros importantes. Por último, estos registros fueron probados mediante análisis dinámico no lineal de respuesta en el tiempo en una estructura de 4 pisos con link diagonales de disipación de energía, obteniendo resultados coherentes y sin anomalías evidentes.

**PALABRAS CLAVES:** Ingeniería sísmica; Algoritmo de wavelet; análisis dinámico no lineal.

### **ABSTRACT**

Chile is a country located along the interaction of the Nazca and South America plates. This interaction generates zones of subduction and events of great magnitude ( $M_w > 8.0$ ) in the coasts of the country. In this paper, seismic records (accelerograms) of  $M_w > 6.5$  were selected from a universe of more than 3000 records from different Chilean and foreign sources. Interface, Inslab and Crustal events were selected from 1985 to 2015. These records were subjected to baseline correction and Butterworth band pass filter. In addition, elastic design spectra were generated for the different seismic zones and soil types C and D according to the standard NCh 433 and Supreme Decree 61. These were used as target spectra for the scaling of the response spectrum of each selected seismic record, using a wavelets algorithm assisted by the SeismoMatch software. We define there are sismotectonic regions throughout the country by assessing the rupture length of major historical earthquakes. In addition, the best 9 records were selected for each proposed region and for the cities of Iquique, Coquimbo and Concepción. These logs are available from OneDrive with information regarding event date, epicenter location and station, depth, PGA, PGD, distance to break, significant duration, among other important parameters. Finally, these registers were tested by nonlinear dynamic response time analysis in a 4-story structure with diagonal linkage of energy dissipation, obtaining consistent results and no apparent anomalies.

**KEYWORDS:** Seismic engineering; Wavelet algorithm; Nonlinear dynamic analysis.

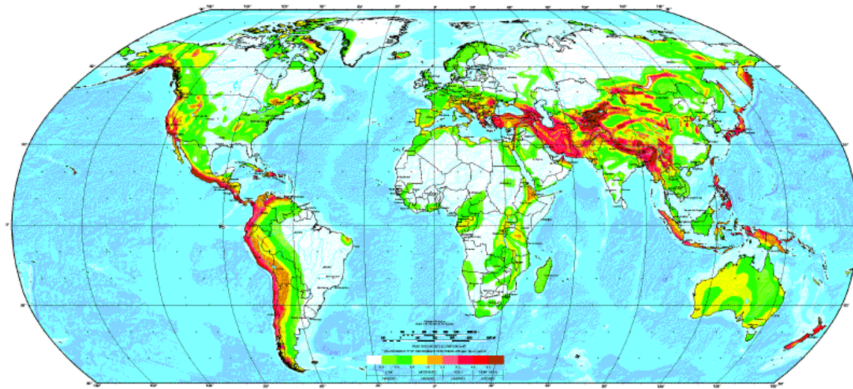
---

<sup>1</sup> Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [eflores@ing.ucsc.cl](mailto:eflores@ing.ucsc.cl)

<sup>2</sup> Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [coyarzo@ucsc.cl](mailto:coyarzo@ucsc.cl)

## 1. INTRODUCCIÓN

Chile es uno de los países con mayor actividad sísmica del planeta, por lo que se encuentra expuesto a la constante amenaza de ocurrencia de terremotos de gran magnitud y de alto potencial destructivo. La interacción entre las placas de Nazca y Sudamericana generan una gran zona de subducción de alta tasa de convergencia. A lo largo de Chile, es posible identificar 3 tipos de sismos según la ubicación de su foco: Sismos Interplaca, Intraplaca y Corticales o Superficiales. Aunque la actividad cortical superficial es de baja recurrencia y se conoce poco de ellos, hallazgos recientes (Cortés-Aranda, 2015) muestran que este tipo de eventos de magnitud significativa han ocurrido en el pasado. En la Figura 1, se muestra el trabajo de Giardini (1999) donde se representa la probabilidad de ocurrencia de terremotos en una escala de colores, de menor probabilidad (blanco) a mayor probabilidad (rojo-café). Se observa que Chile en toda su longitud presenta una alta probabilidad de ocurrencia.



**Figura 1:** Mapa de peligro sísmico global.

Principalmente, los eventos de subducción son los que representan un mayor riesgo para la población en nuestro país. En el último siglo, Chile ha sufrido algunos de los mayores terremotos del mundo, incluyendo el mayor terremoto registrado instrumentalmente en la historia (Valdivia 1960 con Mw 9.5), que dejó aproximadamente 1700 muertos, 3000 heridos, 2 millones de personas sin hogar y un costo total de alrededor del 13% del PIB chileno. En las últimas décadas han ocurrido 4 grandes terremotos en la zona de subducción de tipo Interplaca: el terremoto de Mw 7.9 del año 1985 de Valparaíso, el terremoto de Mw 8.8 del año 2010 de Maule, el terremoto de Mw 8.2 del año 2014 de Iquique, y el terremoto de Mw 8.3 del año 2015 de Illapel. La suma de estos 4 eventos causó alrededor de 670 muertes. En cuanto a los terremotos Intraplaca, el terremoto de 1939 de Mw 7.8 de Chillán causó el récord de muertes con 28000 fallecidos (Bastías y Montalva, 2015).

Dado estos antecedentes, resulta necesario investigar y analizar las mejores prácticas para una ingeniería estricta respecto al diseño y ejecución de estructuras nuevas o ya existentes. Una de estas prácticas de diseño es el análisis dinámico no lineal de respuesta en el tiempo. Este método de análisis estructural es considerado como uno de los más avanzados en la actualidad, pero existen numerosos factores que aún no lo hacen atractivo en el ámbito profesional. Por esta razón es más utilizado en estudios académicos, con el objetivo de validar metodologías más sencillas, las cuales puedan ser aplicadas por la comunidad ingenieril. Sin embargo, el análisis dinámico no lineal ha tomado fuerzas en el último tiempo debido al avance en la capacidad de cálculo y almacenamiento de los computadores.

Al monitorear la respuesta estructural debido a la acción de un registro sísmico, se logran captar las principales características dinámicas de la estructura y su interacción con las propiedades dinámicas

intrínsecas en el registro. Además, se muestra el proceso de generación del daño y, por ende, la degradación estructural, permitiendo corroborar si el diseño realizado cumple o no con los objetivos de desempeño planteados. El principal problema con este tipo de análisis es la definición de la acción sísmica a emplear, pues la respuesta estructural es muy sensible al registro seleccionado como señal excitadora. Por esta razón, algunos autores plantean que la respuesta promedio será representativa para las condiciones de amenaza esperadas para la estructura bajo análisis. El trabajo de Chan, Ruiz, & Montiel (2005) aclara que los registros sísmicos en sus componentes espectrales deben escalarse o ajustarse a un espectro objetivo, además del número mínimo de registros requeridos para el análisis de estructuras varía entre los 3 a 9 registros dependiendo del periodo fundamental de la estructura y confiabilidad o tolerancia de escalamiento, pero aun así, existe la incertidumbre respecto a cuáles son los registros más adecuados para realizar un análisis tiempo historia en un cierto lugar geográfico de Chile.

Los primeros estudios realizados en Chile en el campo de la sismología e ingeniería sísmica estaban orientados a identificar regiones en las cuales la sismicidad pudiese ser considerada uniforme (Gajardo y Lomnitz, 1960; Welkner, 1964; Labbe, 1976). Existen a la fecha un gran número de regionalizaciones sísmicas en el país, siendo las más recientes y utilizadas las de Barrientos (1980), Martín (1990) y Susa (2004).

En esta investigación se define una regionalización sísmica a lo largo del país mediante la evaluación del largo de ruptura de los mayores sismos en la historia. Se proponen los mejores 9 registros sísmicos para cada región definida y para las ciudades de Iquique, Coquimbo y Concepción. Este grupo de registros sísmicos dependen de la zonificación sísmica y tipos de suelo, según la NCh 433 (2009) y DS 61 (MINVU, 2011).

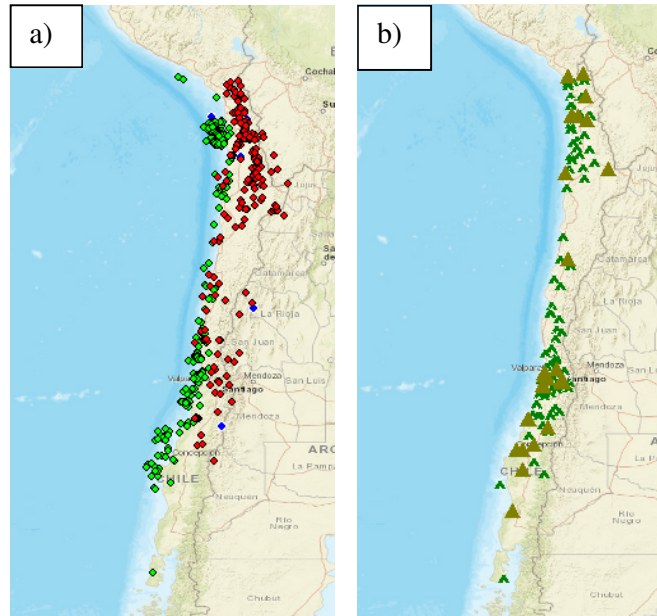
Los registros sísmicos reales seleccionados se corrigieron y filtraron para luego ser ajustados al espectro objetivo mediante el algoritmo de wavelets propuesto por Abrahamson (1992) y Hancock et al. (2006), utilizando el software SeismoMatch (SeismoSoft, 2016).

## **2. COMPILACIÓN DE INFORMACIÓN**

### **2.1 Fuentes de datos**

Los registros y detalles sismológicos se obtuvieron de diferentes fuentes nacionales y extranjeras. Estos provienen de epicentros desde el sur del Perú hasta el Punto Triple, que corresponde al punto donde se encuentra la placa Sudamericana, la placa de Nazca y la placa Antártica, en las cercanías de la Península de Taitao. Registros de los terremotos de Valparaíso del año 1985, Iquique 2014 e Illapel 2015 se obtuvieron de la base de datos COSMOS (2016), los eventos desde el año 1994 al 2010 se obtuvieron del repositorio RENADIC (2016) y aquellos eventos ocurridos a partir del 2011 al 2013 del sitio de CSN (2016). En total se recopilaron 3100 registros de 402 eventos de magnitud de momento 4.6 a 8.8. En la Figura 2a se observan los 402 eventos seleccionados y clasificados en 3 grandes grupos según su tectónica: 203 eventos tipo Interplaca, 191 eventos tipo Intraplaca y 8 eventos tipo Corticales. Considerando que existen varios registros de un mismo evento, se pudo obtener 1852 registros de tipo Interplaca, 1200 de tipo Intraplaca y 48 registros de tipo Cortical. Estos registros provienen de 181 estaciones localizadas a lo largo del país, donde 41 instrumentos son análogos y 140 digitales. Se revisó el informe de mecánica de suelos de las 181 estaciones sísmicas en Chile y se utilizó la velocidad de corte promedio en los 30 primeros metros ( $V_{s30}$ ) para clasificar de acuerdo al DS 61 (MINVU, 2011) el tipo de suelo en que se emplaza cada estación. Se determinaron dos grandes grupos, para el suelo tipo C y D, con 120 y 35 estaciones involucradas, respectivamente (Figura 2b); estos suelos son los más comunes en nuestro país. Los 402 eventos

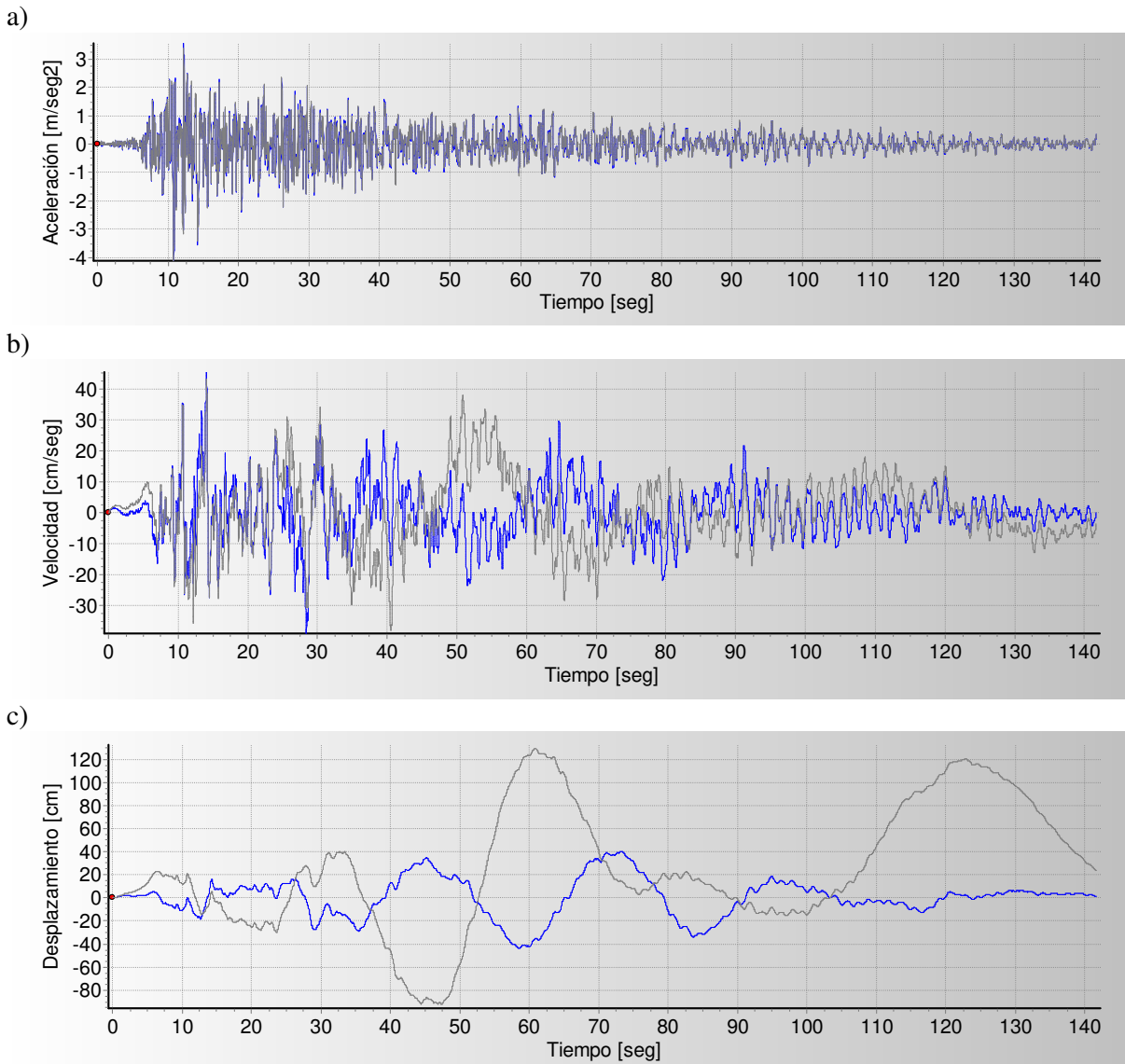
seleccionados fueron utilizados para caracterizar y crear regiones sismogénicamente similares a lo largo del país.



**Figura 2:** Chile continental en polígono rectangular entre las latitudes 13.7°S y 45°S. (a) Epicentros de eventos de tipo Interplaca (verde), Intraplaca (rojo) y Corticales (azul). (b) Estaciones sismométricas emplazadas en suelos tipo C (verde) y D (café).

## 2.2 Selección, corrección y filtro de registros sísmicos

Se seleccionaron los registros provenientes de eventos con  $M_w > 6.5$  (40 eventos), obteniendo un total de 321 registros, 274 de ellos de tipo Interplaca, 27 de tipo Intraplaca y 20 de tipo Cortical. Estos registros provienen de distintas estaciones sísmicas y cada una de ellas tiene un ruido instrumental y ambiental distinto, por lo tanto, se debió aplicar diferentes estrategias de filtrado para limpiar cada registro obtenido. En general, se usó un filtro pasa banda de tipo Butterworth con frecuencias de corte altas y bajas propuestas por Bastías y Montalva (2015). Esto se realizó a través de una rutina en Matlab. Esta rutina reconocía parámetros tales como, código de evento, estación y componente, luego extraía las frecuencias de corte y realizaba una corrección de línea base de polinomio lineal y filtro pasa banda tipo Butterworth de orden 4. Lo que resulta en un procesamiento distinto para las 321 señales seleccionadas. En la Figura 3a, en color gris, se muestra el acelerograma en un estado original del evento de  $M_w 8.8$  del año 2010 registrado por la estación Concepción Centro. En la misma Figura se muestra en color azul el acelerograma corregido y filtrado por frecuencias de corte alta y baja de 30 y 0.02 [Hz], respectivamente. Además, en la Figura 3b y 3c se muestran los resultados del procesamiento en cuanto a velocidades y desplazamientos.



**Figura 3:** Aceleración (a), velocidad (b) y desplazamientos (c) en estado original (gris) y procesados (azul) del acelerograma medido en la estación de Concepción Centro, Terremoto del 2010.

### 3. ESCALAMIENTO O AJUSTE DE LOS REGISTROS SÍSMICOS

En la actualidad, existen diferentes metodologías de escalamiento o ajuste de movimientos sísmicos. En general, estos consisten en ajustar las componentes espectrales de un registro sísmico con un cierto margen de error. Chan, Ruiz, & Montiel (2005) aclaran que los espectros de respuesta de una señal sísmica deben ser ajustados a espectros objetivos, normalmente espectros de diseño. Además, mencionan que el número de análisis mínimo requeridos varía entre los 3 a 9 registros dependiendo de variables como el periodo fundamental, la tolerancia y el nivel de ajuste de escalamiento. También mencionan que la respuesta promedio será representativa para las condiciones de amenaza esperadas para la estructura bajo análisis. Leguísamo y Geovanny (2016) en su trabajo menciona distintas metodologías de escalamiento, como, por ejemplo: escalamiento de registros en el tiempo mediante el método FEMA, método al periodo objetivo, método iterativo de escalamiento (MIE) y el método de normalización de espectro.

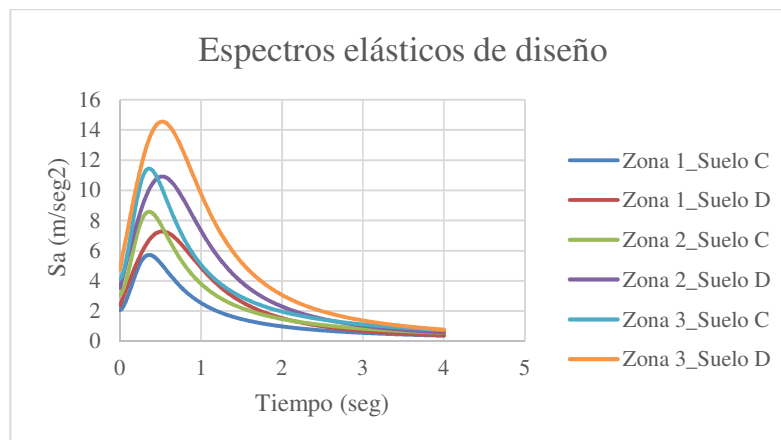
En este trabajo se escalan los registros a través de un método conocido como escalamiento a través de ondeletas o wavelets. El método fue propuesto por Abrahamson (1992) y Hancock et al. (2006), y se utilizó en esta investigación a través del software SeismoMatch (SeismoSoft, 2016).

### 3.1 Creación de espectros objetivos

El espectro objetivo es utilizado para el ajuste o escalamiento de un espectro de respuesta de una serie de tiempo. Se utilizó como espectro objetivo el espectro elástico de diseño según la NCh 433 (2009) y el DS 61 (MINVU, 2011). En el apartado 6.3.5.1 de la norma chilena se muestra la Ecuación 1, esta depende del factor de importancia ( $I$ ), aceleración efectiva según zonificación sísmica ( $A_0$ ), factor de amplificación ( $\alpha$ ) y factor de reducción ( $R^*$ ). Este último factor reduce las componentes espectrales de diseño producto de la no linealidad de los materiales que componen la estructura. Para este trabajo este factor de reducción tomará valor 1, dado a que los registros se probarán en un modelo con comportamiento no lineal a través de links diagonales de disipación de energía.

$$S_a = \frac{IA_0\alpha}{R^*} \quad (1)$$

Existen 3 tipos de zonas sísmicas que determinan las aceleraciones efectivas del suelo. La Zona 3 es la más cercana a la costa, tiene aceleración efectiva de 0.4g, le sigue la Zona 2 con 0.3g y finalmente la Zona 1 cercana a la cordillera de los Andes con una aceleración efectiva de 0.2g. Además, la combinatoria entre los tipos de suelo C y D y zonas sísmicas determinan 6 espectros elásticos de diseño distintos, estos se muestran en la Figura 4.



**Figura 4:** Espectros elásticos de diseño según la NCh 433 y DS 61.

### 3.2 Escalamiento de espectro de respuesta a espectro objetivo mediante wavelets

La compañía SeismoSoft (2016) lanza este 2016 una nueva versión del software SeismoMatch. Este software es capaz de ajustar los acelerogramas de terremotos para que coincidan con un espectro de respuesta objetivo, utilizando el algoritmo de wavelets propuesto por Abrahamson (1992) y Hancock et al. (2006).

En este trabajo, se sometieron a escalamiento los 321 registros provenientes de los terremotos con  $M_w > 6.5$ , los cuales fueron previamente corregidos y filtrados. Este proceso de ajuste al espectro objetivo se realizó entre los periodos 0.02 y 2.5 segundos del espectro de respuesta, considerando un 5% de amortiguamiento crítico. Además, el procesamiento se efectuó con un parámetro específico de tolerancia de 0.3. Este parámetro, especifica el desajuste máximo que controla el proceso de

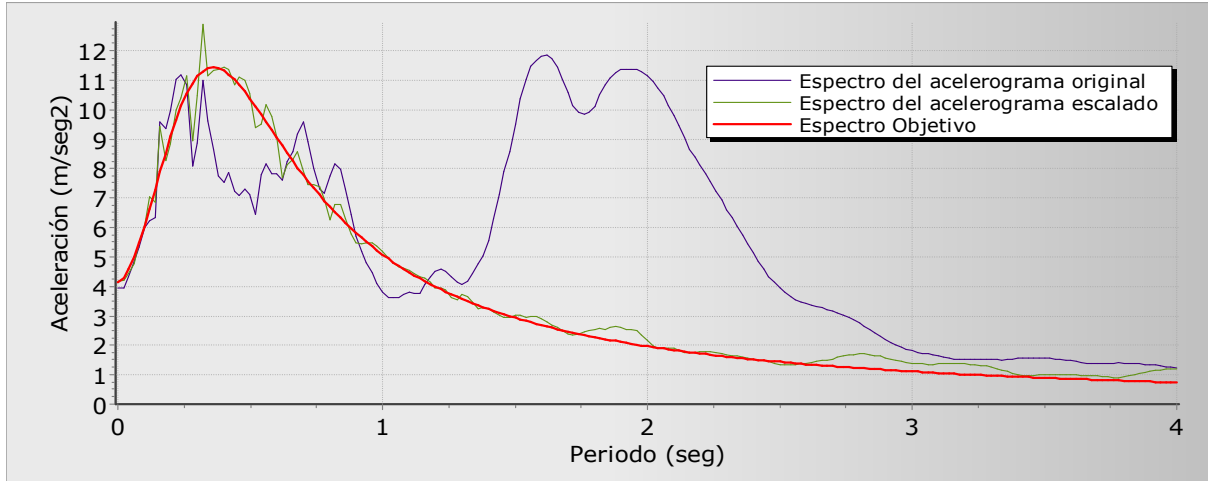
convergencia con un error promedio de no más del 10% en todo el tramo de tiempo de escalamiento y en no más de un 30% de error absoluto en cualquier instante de tiempo en estudio.

Se generaron 6 procesamientos distintos en función de los espectros elásticos de diseño creados, obteniendo alrededor de 90 registros escalados por grupo. Estos se detallan en la Tabla 1. Además, se ofrece una planilla detallada para cada grupo de registros escalados, con información respecto a fecha, ubicación de epicentro y estación, profundidad, magnitud, PGA, PGD, duración significativa, entre otros parámetros importantes.

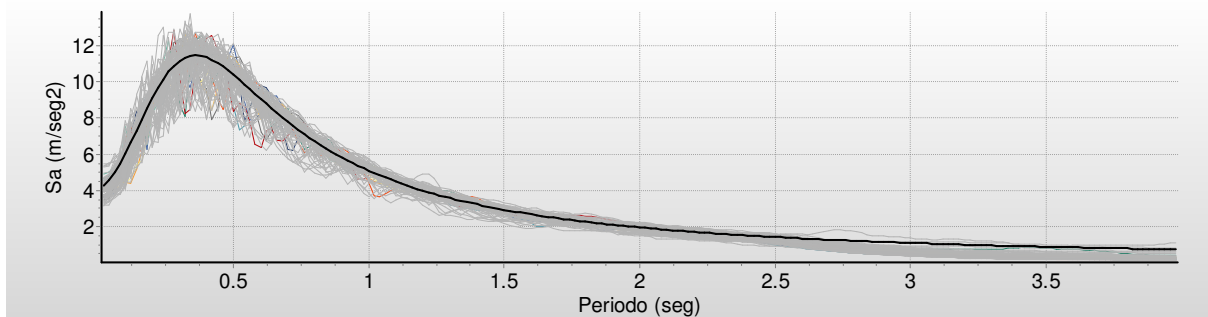
**Tabla 1:** Cantidad de registros escalados según zona sísmica y tipo de suelo.

Zona sísmica	Número de registros escalados	
	Suelo tipo C	Suelo tipo D
1	89	84
2	95	97
3	90	93

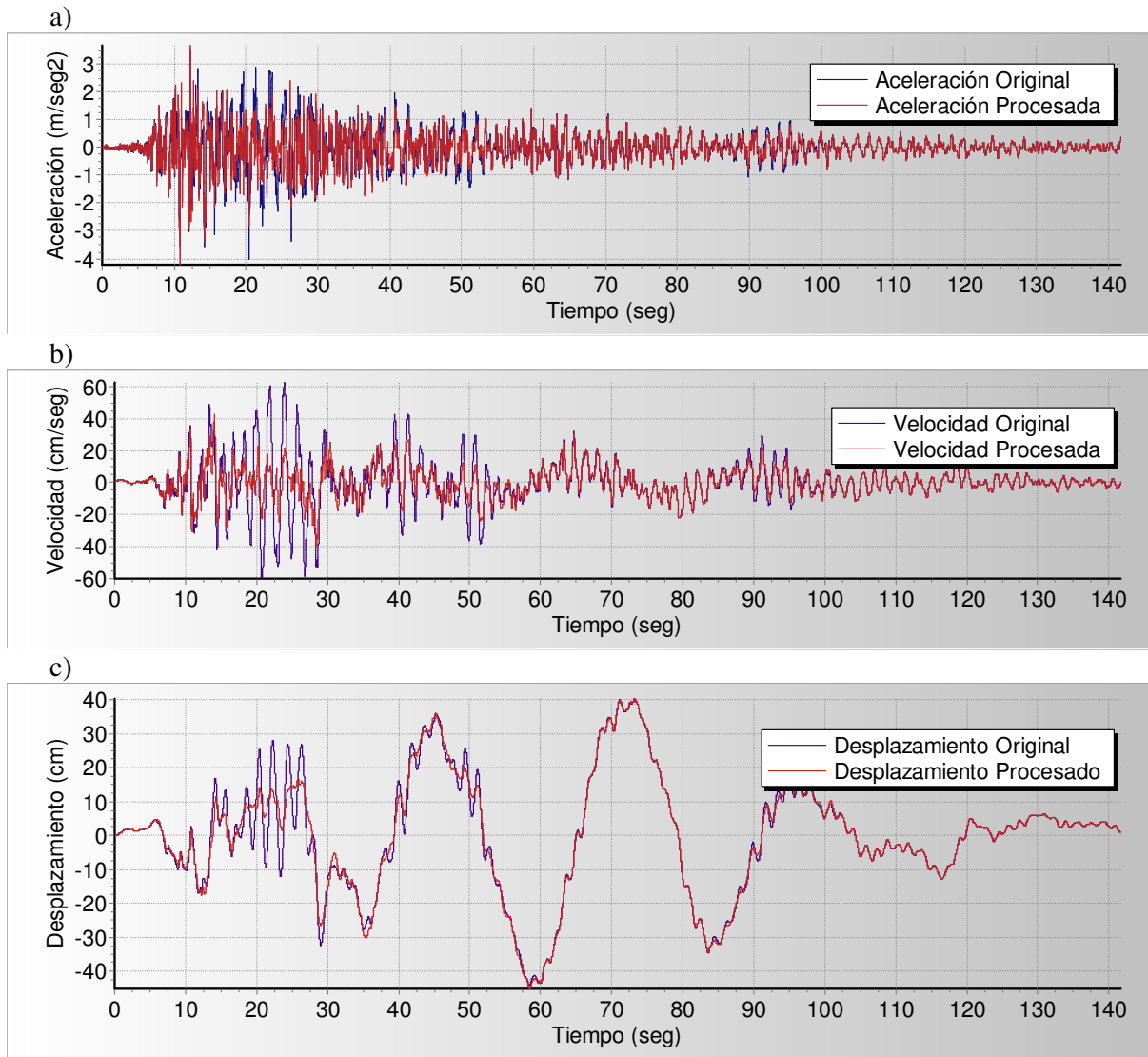
En la Figura 5, se muestra el espectro objetivo para una zona sísmica 3 y suelo tipo C (rojo), espectro de respuesta real (azul) y espectro de respuesta modificado (verde) del terremoto de Mw 8.8 del año 2010, registrado por la estación de Concepción Centro. En la Figura 6, se muestra el grupo de 90 registros escalados para la misma zona y tipo de suelo. También, en la Figura 7a se muestra con color azul la serie de tiempo original y con color rojo la serie de tiempo modificada. En la Figura 7b y 7c, se muestra la velocidad y desplazamiento en estado original y modificado.



**Figura 5:** Escalamiento a través del software SeismoMatch, Terremoto Maule 2010.



**Figura 6:** Espectros escalados para la zona sísmica 3 y suelo tipo C.



**Figura 7:** Comparación del tiempo historia entre un acelerograma real y escalado. a) Aceleraciones, b) velocidades y c) desplazamientos.

#### 4. REGIONALIZACIÓN SÍSMICA EN CHILE

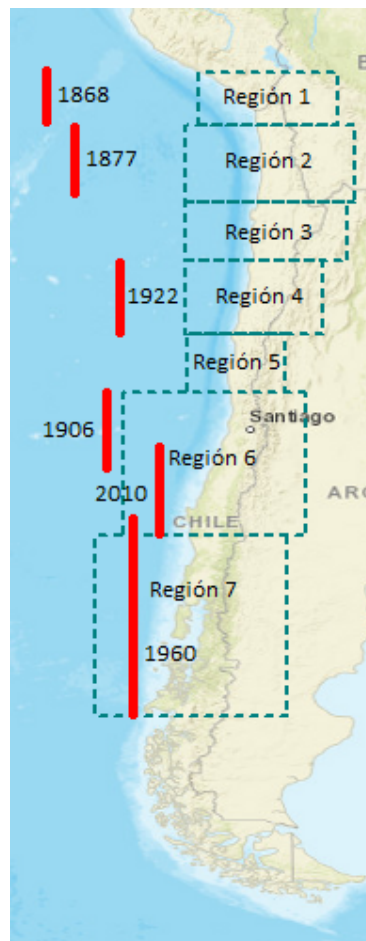
Los trabajos de Gajardo y Lomnitz (1960), Welkner (1964) y Labbe (1976) fueron unos de los primeros estudios en Chile realizados en el área de la sismología e ingeniería sísmica, estos estaban orientados principalmente a identificar regiones con sismicidades que pudiesen ser consideradas uniformes. Los trabajos de Barrientos (1980), Martín (1990) y Susa (2004) son los más recientes y usados, en el que proponen regionalizaciones sísmicas en Chile. Este último, define zonas sismotectónicas mediante la evaluación del largo de ruptura de los mayores sismos en la historia.

El trabajo de Santibáñez (2013) menciona que la placa de Nazca se desplaza hacia el Este con una velocidad de convergencia cercana a 6.6 cm/año y a su vez, la placa Sudamericana se desplaza unos 3 cm/año en dirección aproximada hacia el Oeste, lo que origina una tasa neta de convergencia estimada entre 8 a 9 cm/año (Silva, 2008). Esta subducción define un plano conocido como Plano de Wadati & Benioff, que corresponde al lugar geométrico donde ocurren los hipocentros de sismos en

zonas de subducción. Este Plano presenta una inclinación hacia el oriente, con un ángulo que varía entre  $10^\circ$  a  $30^\circ$  a lo largo del país definiendo tres zonas de segmentación de la Placa de Nazca para Chile (Barazangi y Isacks, 1976):

- a) Segmento 1: Zona comprendida entre los paralelos  $15^\circ$  S y  $27^\circ$  S donde la placa de Nazca desciende bajo el continente sudamericano con un ángulo de unos  $25^\circ$  a  $30^\circ$ .
- b) Segmento 2: Zona comprendida entre los paralelos  $26^\circ$  S y  $33^\circ$  S, donde la placa de Nazca se flecta bajo el continente sudamericano y desciende bajo Argentina con un ángulo de sólo unos  $10^\circ$  de inclinación antes de continuar su descenso en el manto.
- c) Segmento 3: A partir de los  $33^\circ$  S, la zona de Benioff vuelve a tener un ángulo de cerca de  $30^\circ$  de inclinación con una sismicidad que no se extiende más allá de 200 km de profundidad.

Con estos argumentos, se crea y actualiza la regionalización propuesta por Susa (2004), además, se incorpora a la investigación los últimos grandes terremotos en el país. En la Figura 8, se muestra la nueva regionalización sísmica en Chile utilizada para esta investigación, esta fue creada mediante la evaluación de largos de ruptura de los mayores terremotos históricos según el trabajo de Susa (2004) y el Centro de Sismología Nacional. En la Tabla 2, se indican los detalles de epicentros aproximados, magnitudes y largos de ruptura de los terremotos utilizados en la Figura 8.



**Figura 8:** Regionalización sísmica y largos de ruptura de terremotos históricos. Polígono rectangular de Chile continental entre las latitudes  $13.7^\circ$ S y  $56.7^\circ$ S.

**Tabla 2:** Magnitudes y Largos de Ruptura de terremotos mencionados en regionalización sísmica.

Fecha	Latitud Epicentro aproximado	Magnitud	Largo de Ruptura (Proyección vertical)
(D-M-A)	(°)	Ms ó Mw	(km)
13-08-1868	-18.3	8.5 Ms	278
09-05-1877	-19.6	8.2 Ms	444
08-08-1906	-33	8.4 Ms	378
11-11-1922	-28.5	8.3 Ms	389
22-05-1960	-39.5	9.5 Mw	944
27-02-2010	-36.2	8.8 Mw	630

En la Tabla 3 se describen las regiones sísmicas creadas, sus respectivos límites y la correspondiente información sismotectónica. Además, se crea una caracterización de dichas zonas a partir de los 402 eventos entre Mw 4.6 y 8.8 mencionados en el punto 2.1 de este trabajo. Se muestran valores máximos, mínimos y promedios de profundidades, duraciones significativas y magnitudes de momento, esto se muestra en las Tablas 4, 5 y 6 para tectónicas Interplaca, Intraplaca y Corticales, respectivamente.

**Tabla 3:** Regionalización Sísmica y detalles sismotectónicos.

Región Sismotectónica		Límites Latitud (°S)
Región 1	Definida por el terremoto de 1868.	16.5 - 19
Región 2	Definida por el terremoto de 1877.	19 - 22.7
Región 3	Definida por límite inferior del terremoto de 1877 y límite superior del terremoto de 1922.	22.7 - 25.4
Región 4	Definida por el terremoto de 1922.	25.4 - 28.9
Región 5	Definida por límite inferior del terremoto de 1922 y límite superior del terremoto de 1906	28.9 - 31.7
Región 6	Definida por el límite superior del terremoto de 1906 y el límite inferior del terremoto del 2010	31.7 - 38.5
Región 7	Definida por límite inferior del terremoto del 2010 y el límite inferior del terremoto de 1960	38.5 - 47
Región Austral	Definida por la escasa sismicidad presente al sur del Punto Triple	47 - 56

**Tabla 4:** Caracterización de regiones sísmicas para sismos Interplaca.

Región y cantidad de registros		Profundidad [km]	Duración significativa [seg]	Magnitud [Mw]
Región 1 3 registros	Promedio	31.2	53.3	7.4
	Min	25	41.2	6.2
	Max	38.9	61.7	8.4
Región 2 133 registros	Promedio	36.3	63.1	5.4
	Min	13.9	8.1	4.6
	Max	52.1	171.7	8.1
Región 3 10 registros	Promedio	40.6	40.0	6.3
	Min	29.7	22.3	5.1
	Max	47.4	77.3	8.0
Región 4 10 registros	Promedio	36	45.0	5.7
	Min	5	21.9	4.7
	Max	55	82.0	6.8
Región 5 25 registros	Promedio	41.6	40.9	6.0
	Min	16.5	13.1	5.1
	Max	63.3	93.5	8.2
Región 6 21 registros	Promedio	31.6	56.5	5.6
	Min	10.1	10.2	4.9
	Max	55	116.13	8.8
Región 7 1 registro	Promedio	32.0	25.8	5.2
	Min	32.0	25.8	5.2
	Max	32.0	25.8	5.2

**Tabla 5:** Caracterización de regiones sísmicas para sismos Intraplaca.

Región y cantidad de registros		Profundidad [km]	Duración significativa [seg]	Magnitud [Mw]
Región 1	Promedio	118.4	38.1	5.5
19 registros	Min	79.9	21.1	4.9
	Max	179.9	62.7	6.4
Región 2	Promedio	111.9	50.9	5.3
97 registros	Min	53.0	2.7	4.6
	Max	212.4	106.2	7.8
Región 3	Promedio	135.0	57.9	5.1
30 registros	Min	46.5	42.8	4.8
	Max	265.3	154.9	5.6
Región 4	Promedio	77.3	60.6	5.2
12 registros	Min	50.1	19.7	4.8
	Max	113.8	117.2	5.9
Región 5	Promedio	77.3	48.5	5.4
12 registros	Min	46.9	16.2	4.9
	Max	135.0	74.5	7.1
Región 6	Promedio	98.2	54.2	5.2
21 registros	Min	41.3	16.6	4.9
	Max	159.2	165.4	6.4

**Tabla 6:** Caracterización de regiones sísmicas para sismos Corticales

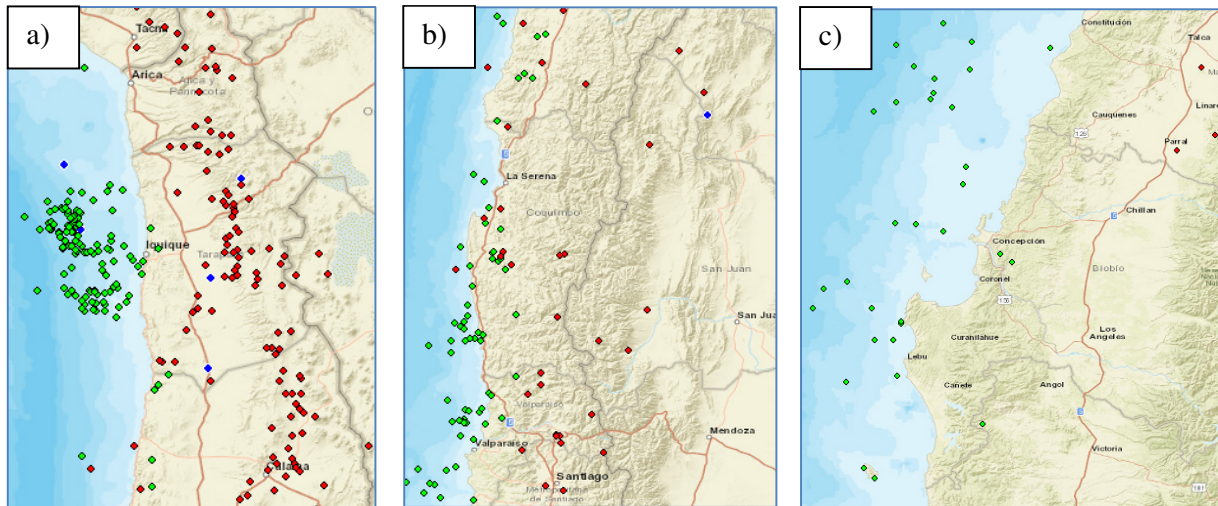
Región y cantidad de registros		Profundidad [km]	Duración significativa [seg]	Magnitud [Mw]
Región 1	Promedio	39	21.62	5.5
1 registro	Min	39	21.62	5.5
	Max	39	21.62	5.5
Región 2	Promedio	30.2	54.33	5.72
5 registros	Min	15	25.29	4.9
	Max	41.6	133.48	6.7
Región 5	Promedio	8.1	45.96	5.7
1 registro	Min	8.1	45.96	5.7
	Max	8.1	45.96	5.7
Región 6	Promedio	15.1	19.97	6.5
1 registro	Min	15.1	19.97	6.5
	Max	15.1	19.97	6.5

## 5 ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL DE RESPUESTA EN EL TIEMPO PARA CIUDADES DE IQUIQUE, COQUIMBO Y CONCEPCIÓN

### 5.1 Selección de registros sísmicos para las ciudades de Iquique, Coquimbo y Concepción

De la base de datos de los registros corregidos, filtrados y escalados (mencionados en el punto 3.2), se seleccionan 9 registros para las ciudades de Iquique, Coquimbo y Concepción, ciudades ubicadas en las regiones sísmicas caracterizadas 2, 5 y 6, respectivamente (Figura 8). En la Figura 9, se observa que estas son ciudades costeras y relacionadas fuertemente con eventos tipo Interplaca (verde), le siguen los eventos tipo Intraplaca (rojo) y finalmente eventos tipo Cortical (azul) con una menor participación.

Para la ciudad de Iquique, se seleccionaron 6 registros tipo Interplaca con profundidades entre los 13.9 [km] y 52.1 [km], 2 registros Intraplaca con profundidades promedio de 111 [km] y un registro Cortical con profundidades entre 15 [km] y 41.6 [km]. Para la ciudad de Coquimbo, se seleccionaron 6 registros tipo Interplaca con profundidades entre los 16.5 [km] y 63.3 [km], 2 registros Intraplaca con profundidades entre 77.3 [km] y 135 [km] y un registro Cortical. Por último, para la ciudad de Concepción, se seleccionaron 7 registros tipo Interplaca con profundidades entre los 31.6 [km] y 55 [km] y 2 registros Intraplaca con profundidades entre 98.2 [km] y 159.2 [km]. Además, el criterio general de selección para todas las ciudades fue priorizar registros provenientes de las mismas zonas de segmentación (si los hubiera), registros con buena duración significativa (cerca de la media) y registros provenientes de estaciones cercanas a la zona de ruptura. Esta selección fue realizada con registros escalados para la zona sísmica 3 según NCh 433 (2009) y suelos tipo C y D. En las Tablas 7 al 12 se indican los registros seleccionados para las ciudades de Iquique, Coquimbo y Concepción, para dicha zona sísmica y tipos de suelo, en estos se indican el código del evento (Bastías y Montalva, 2015), fecha, magnitud, profundidad, duración significativa, PGA, tipo de tectónica y número de acelerograma seleccionado.



**Figura 9:** Epicentros de eventos tipo Interplaca (verde), Intraplaca (rojo) y Corticales (azul). (a) Ciudad de Iquique en polígono rectangular entre las latitudes 17.7°S y 22.7°S. (b) Ciudad de Coquimbo en polígono rectangular entre las latitudes 27.8°S y 33.7°S. (c) Ciudad de Concepción en polígono rectangular entre las latitudes 35.2°S y 38.5°S.

**Tabla 7:** Registros seleccionados para la ciudad de Iquique ubicada en región sísmica 2, suelo tipo C.

Código Evento	Año	Magnitud [Mw]	Profundidad [km]	Duración Significativa [seg]	PGA [m/seg <sup>2</sup> ]	Tectónica	Acelerograma [N°]
50062	2007	7.7	47.7	21.99	4.14	Interplaca	5
50047	2005	7.8	114.9	10.68	4.68	Intraplaca	15
50001	1985	7.9	33	37.92	5.09	Interplaca	23
50016	1999	6.5	138.2	6.21	4.21	Intraplaca	28
50020	2001	8.4	29.6	16.1	4.07	Interplaca	32
50090	2014	6.7	20.6	6.64	4.05	Cortical	52
50092	2014	7.7	27.7	29.12	3.51	Interplaca	54
50091	2014	8.1	38.9	31.17	4.36	Interplaca	62
50022	2001	7.6	25	26.21	3.59	Interplaca	82

**Tabla 8:** Registros seleccionados para la ciudad de Coquimbo ubicada en región sísmica 5, suelo tipo C.

Código Evento	Año	Magnitud [Mw]	Profundidad [km]	Duración Significativa [seg]	PGA [m/seg <sup>2</sup> ]	Tectónica	Acelerograma [N°]
50047	2005	7.8	114.9	10.68	4.68	Intraplaca	15
50001	1985	7.9	33	37.92	5.09	Interplaca	23
50016	1999	6.5	138.2	6.21	4.21	Intraplaca	28
50090	2014	6.7	20.6	6.64	4.05	Cortical	52
50091	2014	8.1	38.9	31.17	4.36	Interplaca	62
50399	2013	6.5	52	9.36	3.97	Interplaca	65
50670	2015	8.2	23.3	55.52	4.20	Interplaca	66
50002	1985	7.1	37	19.54	4.17	Interplaca	75
50087	2010	8.8	30.1	84.95	4.11	Interplaca	87

**Tabla 9:** Registros seleccionados para la ciudad de Concepción ubicada en región sísmica 6, suelo tipo C.

Código Evento	Año	Magnitud [Mw]	Profundidad [km]	Duración Significativa [seg]	PGA [m/seg <sup>2</sup> ]	Tectónica	Acelerograma [N°]
50047	2005	7.8	114.9	10.68	4.68	Intraplaca	15
50001	1985	7.9	33	37.92	5.09	Interplaca	23
50016	1999	6.5	138.2	6.21	4.21	Intraplaca	28
50092	2014	7.7	27.7	29.12	3.51	Interplaca	54
50091	2014	8.1	38.9	31.17	4.36	Interplaca	62
50002	1985	7.1	37	19.54	4.17	Interplaca	75
50062	2007	7.7	47.7	27.59	4.19	Interplaca	85
50069	2007	6.7	45.2	13.11	4.01	Interplaca	86
50087	2010	8.8	30.1	84.95	4.11	Interplaca	87

**Tabla 10:** Registros seleccionados para la ciudad de Iquique ubicada en región sísmica 2, suelo tipo D.

Código Evento	Año	Magnitud [Mw]	Profundidad [km]	Duración Significativa [seg]	PGA [m/seg <sup>2</sup> ]	Tectónica	Acelerograma [N°]
50020	2001	8.4	29.6	15.97	5.62	Interplaca	22
50001	1985	7.9	33	31.7	6.17	Interplaca	33
50016	1999	6.5	138.2	6.22	5.37	Intraplaca	40
50047	2005	7.8	114.9	12.9	5.69	Intraplaca	44
50090	2014	6.7	20.6	6.77	5.06	Cortical	61
50092	2014	7.7	27.7	10.83	4.86	Interplaca	66
50091	2014	8.1	38.9	33.95	6.55	Interplaca	73
50670	2015	8.2	23.3	49.48	5.99	Interplaca	75
50087	2010	8.8	30.1	80.97	4.78	Interplaca	92

**Tabla 11:** Registros seleccionados para la ciudad de Coquimbo ubicada en región sísmica 5, suelo tipo D.

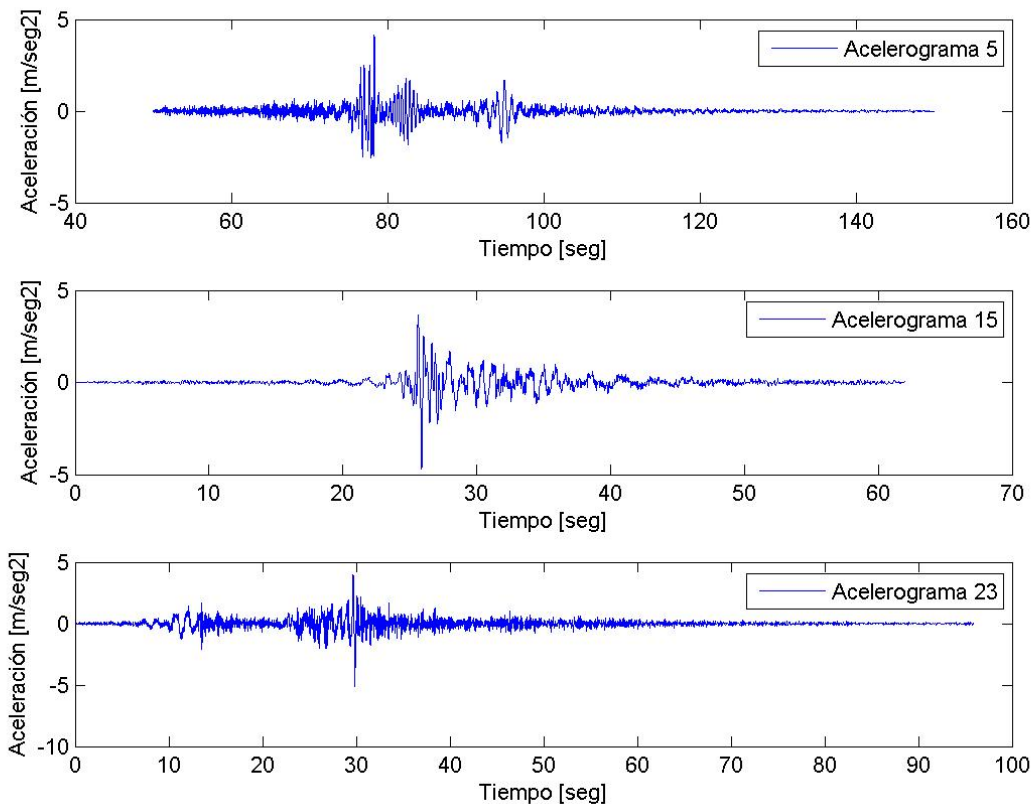
Código Evento	Año	Magnitud [Mw]	Profundidad [km]	Duración Significativa [seg]	PGA [m/seg <sup>2</sup> ]	Tectónica	Acelerograma [N°]
50020	2001	8.4	29.6	15.97	5.62	Interplaca	22
50001	1985	7.9	33	31.7	6.17	Interplaca	33
50016	1999	6.5	138.2	6.22	5.37	Intraplaca	40
50047	2005	7.8	114.9	12.9	5.69	Intraplaca	44
50090	2014	6.7	20.6	6.77	5.06	Cortical	61
50670	2015	8.2	23.3	49.48	5.99	Interplaca	75
50676	2015	6.8	40.7	9.12	5.44	Interplaca	77
50002	1985	7.1	37	19.92	5.19	Interplaca	80
50087	2010	8.8	30.1	80.97	4.78	Interplaca	92

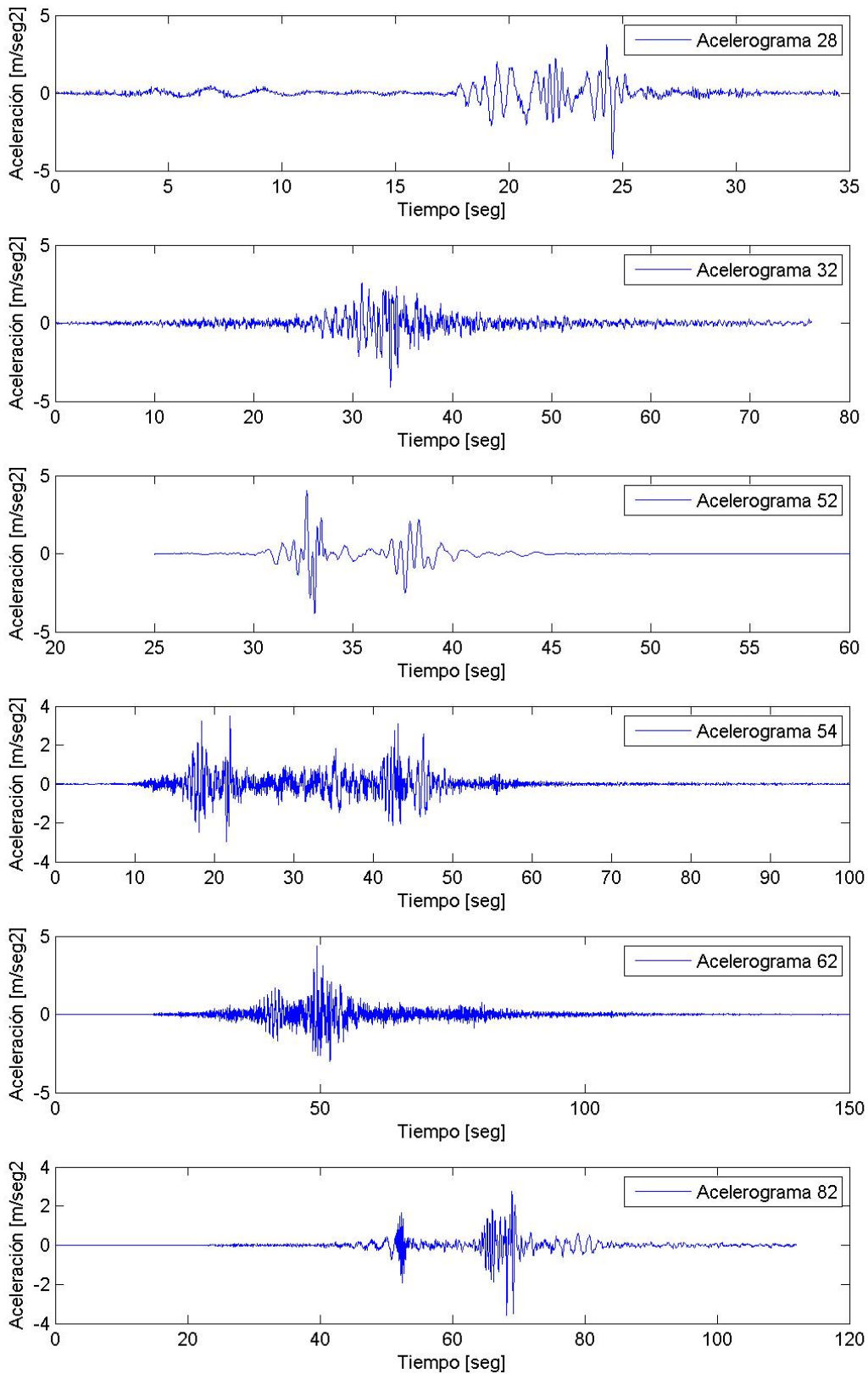
**Tabla 12:** Registros seleccionados para la ciudad de Concepción ubicada en región sísmica 6, suelo tipo D.

Código Evento	Año	Magnitud [Mw]	Profundidad [km]	Duración Significativa [seg]	PGA [m/seg <sup>2</sup> ]	Tectónica	Acelerograma [N°]
50001	1985	7.9	33	31.7	6.17	Interplaca	33
50016	1999	6.5	138.2	6.22	5.37	Intraplaca	40
50047	2005	7.8	114.9	12.90	5.69	Intraplaca	44
50091	2014	8.1	38.1	28.04	4.90	Interplaca	65
50092	2014	7.7	27.7	22.14	5.31	Interplaca	68
50670	2015	8.2	23.3	49.48	5.99	Interplaca	75
50062	2007	7.7	47.7	22.22	5.98	Interplaca	90
50069	2007	6.7	45.2	12.01	5.81	Interplaca	91
50087	2010	8.8	30.1	80.97	4.78	Interplaca	92

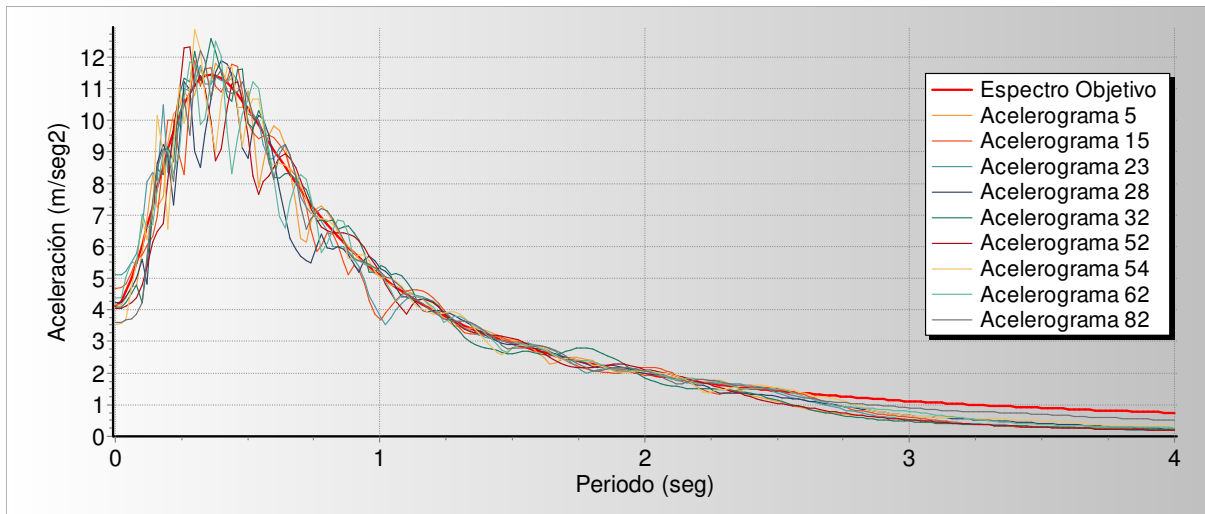
### 5.2 Análisis dinámico no lineal de respuesta en el tiempo para estructuras con disipación de energía

Se realizaron pruebas de los registros seleccionados para las ciudades de Iquique, Coquimbo y Concepción, a través del análisis dinámico no lineal de respuesta en el tiempo. En la Figura 10 y 11, se muestran los acelerogramas seleccionados para la ciudad de Iquique, para un suelo tipo C. En la Figura 12, se muestran los respectivos espectros de respuesta de cada acelerograma seleccionado.


**Figura 10:** Acelerogramas (N° 5, 15 y 23) seleccionados para Iquique, escalados para Zona 3 y tipo de suelo C.



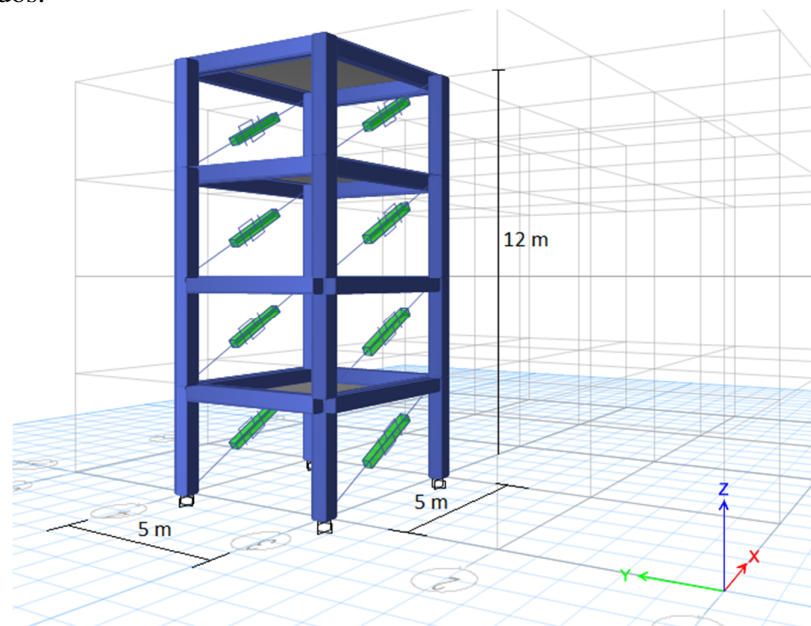
**Figura 11:** Acelerogramas (N° 28, 32, 52, 54, 62 y 82) seleccionados para Iquique, escalados para Zona 3 y tipo de suelo C.



**Figura 12:** Espectros de respuesta de acelerogramas seleccionados para Iquique, escalados a Zona 3 y suelo tipo C.

Para realizar este análisis, se creó en ETABS un modelo numérico de una estructura de hormigón armado de 4 pisos de igual altura, cada piso de 3 metros. Este modelo se compone de vigas de 40x30 [cm], columnas de 40x40 [cm] y losas de 15 [cm] de espesor. Además, se asignó una sobrecarga de uso de 2.5 [kPa] según la NCh 1537 (2009).

Se asignó al modelo 8 links diagonales de disipación de energía tipo Plastic Wen, como se muestra en la Figura 13. Las propiedades no lineales de los links, en cuanto a rigidez y fuerza de fluencia se asignaron de tal forma que estos elementos no lineales pudieran tomar acción durante todos los análisis ejecutados.



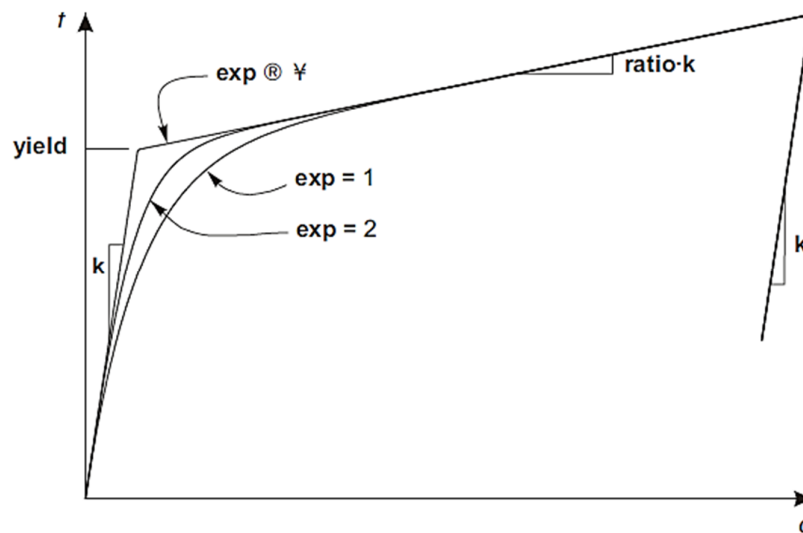
**Figura 13:** Estructura de 4 pisos para análisis no lineal.

En la Figura 14, se muestra la gráfica de la función y parámetros del comportamiento no lineal del link Plastic Wen utilizado. La función fuerza – deformación se indica en la Ecuación 2 y se muestra a continuación.

$$f = \text{ratio} \cdot k \cdot d + (1 - \text{ratio}) \cdot \text{yield} \cdot z \quad (2)$$

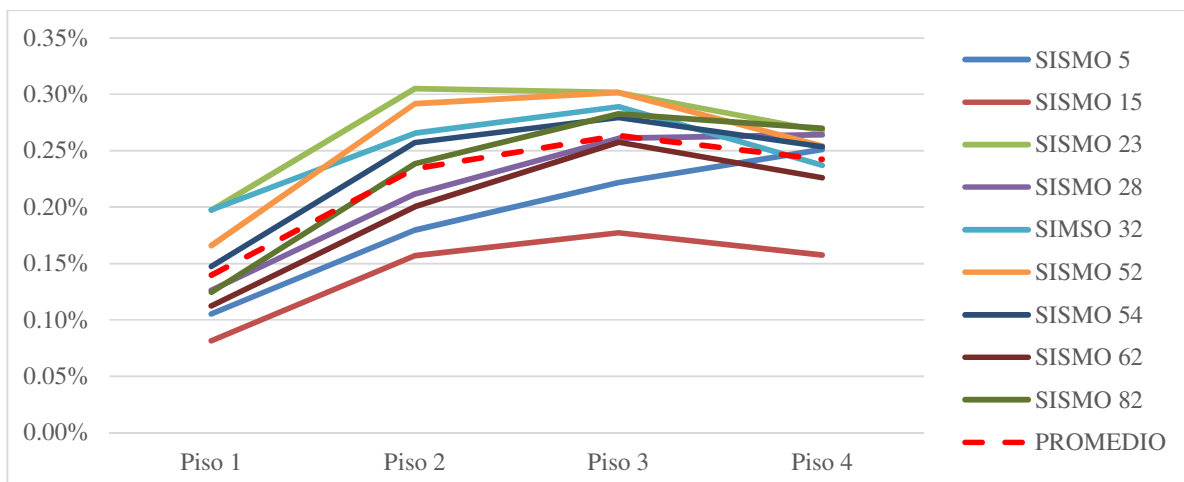
Donde  $k$  es la rigidez elástica,  $\text{yield}$  es la fuerza de fluencia,  $\text{ratio}$  es el factor de proporción aplicado a la rigidez elástica después de alcanzar la fuerza de fluencia, y  $z$  es una variable histerética interna que se rige por la Ecuación 3. Por último,  $\text{exp}$  es el exponente utilizado para la curvatura de la función.

$$\dot{z} = \frac{k}{\text{yield}} \begin{cases} \dot{d}(1 - |z|^{\text{exp}}) & \text{si } \dot{d} z > 0 \\ \dot{d} & \text{en todos los otros casos} \end{cases} \quad (3)$$



**Figura 14:** Diagrama de histéresis y parámetros predominantes del elemento Plastic (Wen).

En la Figura 15 a 20, se muestran los desplazamientos de entre piso máximos y promedio (Tabla 13) obtenidos para las distintas ciudades y tipos de suelo C y D. Se prueba que la respuesta estructural obtenida para cada caso es coherente y sin ninguna anomalía.



**Figura 15:** Desplazamientos de entre piso máximos y promedio para registros seleccionados en Iquique, suelo tipo C.

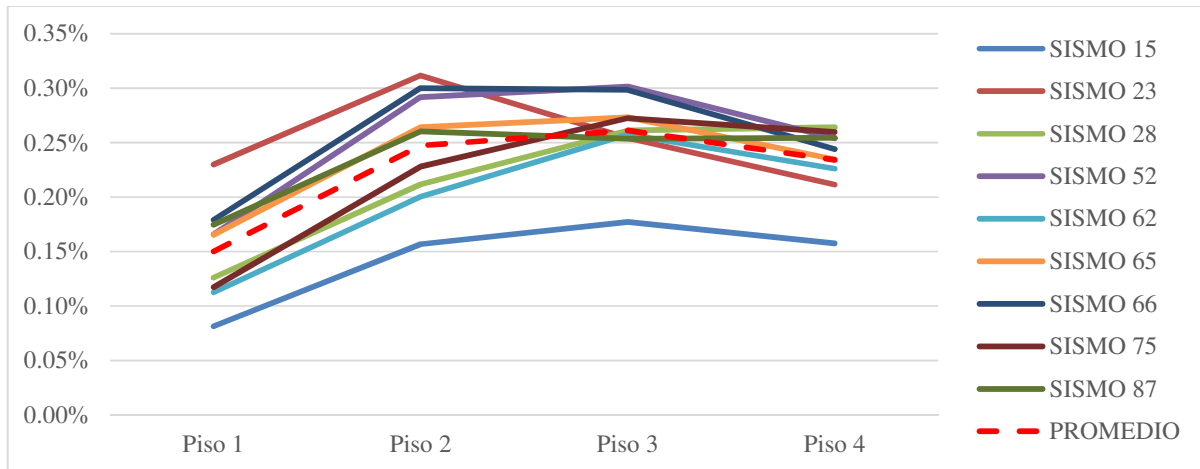


Figura 16: Desplazamientos de entre piso máximos y promedio para registros seleccionados en Coquimbo, suelo tipo C.

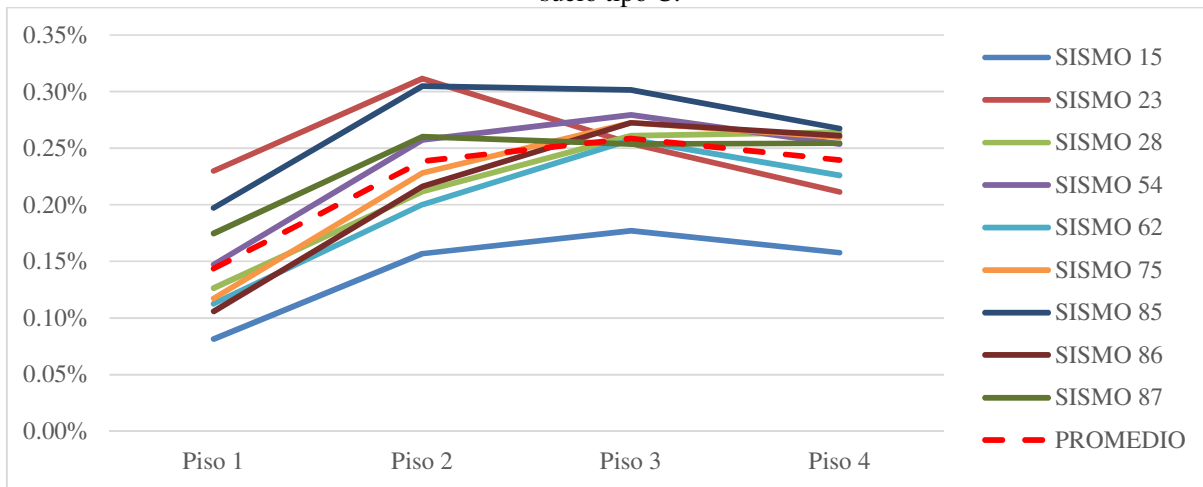


Figura 17: Desplazamientos de entre piso máximos y promedio para registros seleccionados en Concepción, suelo tipo C.

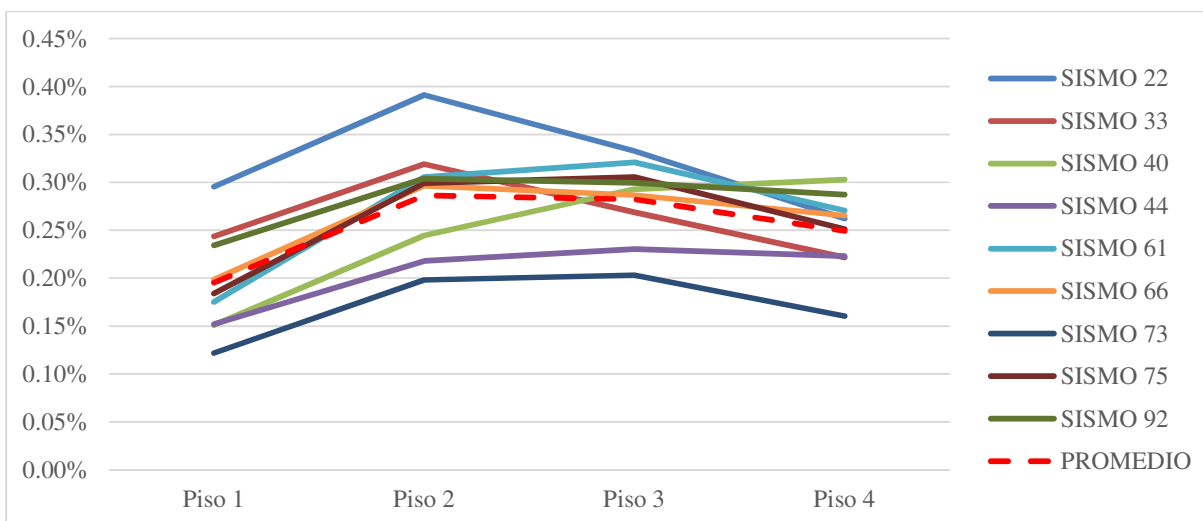
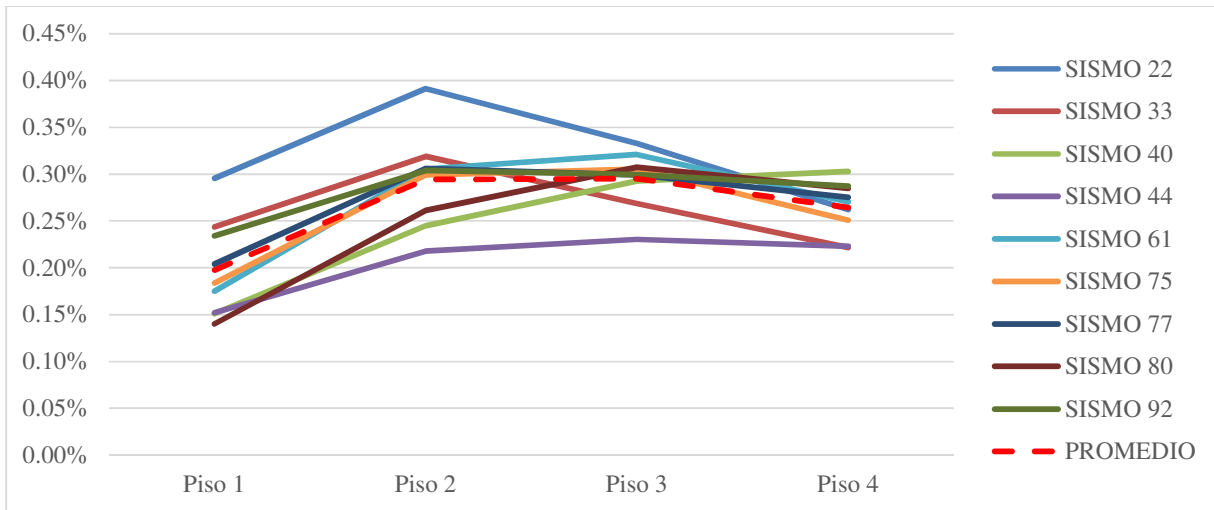
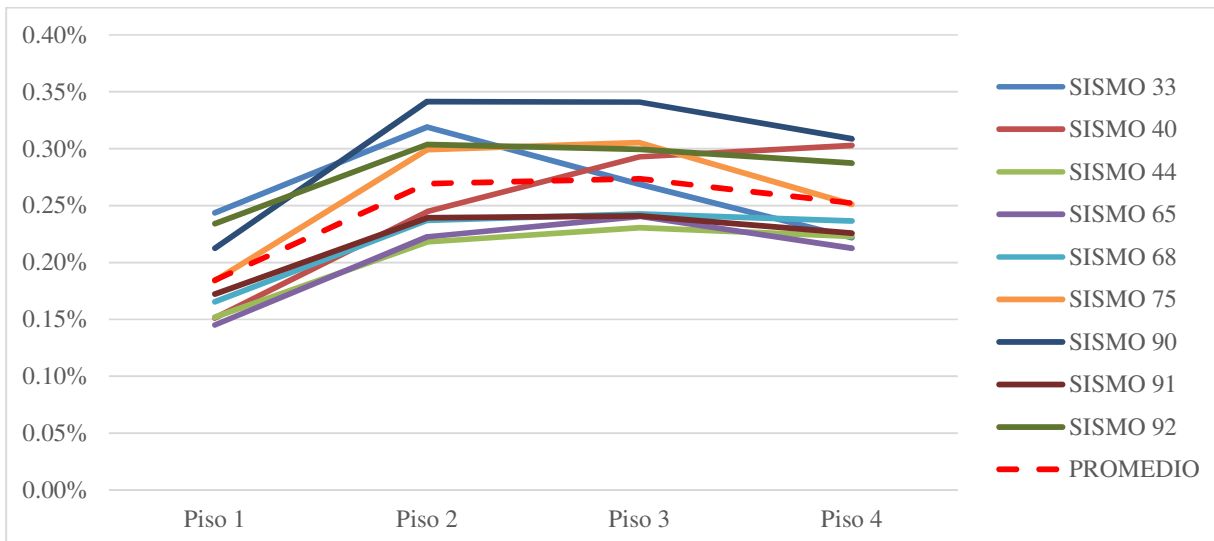


Figura 18: Desplazamientos de entre piso máximos y promedio para registros seleccionados en Iquique, suelo tipo D.



**Figura 19:** Desplazamientos de entre piso máximos y promedio para registros seleccionados en Coquimbo, suelo tipo D.



**Figura 20:** Desplazamientos de entre piso máximos y promedio para registros seleccionados en Concepción, suelo tipo D.

**Tabla 13:** Desplazamientos de entre piso máximos promedio para las ciudades de Iquique, Coquimbo y Concepción

	Iquique		Coquimbo		Concepción	
	Suelo C	Suelo D	Suelo C	Suelo D	Suelo C	Suelo D
Piso 1	0.14%	0.20%	0.15%	0.20%	0.14%	0.18%
Piso 2	0.23%	0.29%	0.25%	0.29%	0.24%	0.27%
Piso 3	0.26%	0.28%	0.26%	0.30%	0.26%	0.27%
Piso 4	0.24%	0.25%	0.23%	0.26%	0.24%	0.25%

## 5. CONCLUSIONES

El número de registros escalados a través de esta metodología (algoritmo de wavelets), depende fuertemente de la tolerancia y rango de periodo en escalamiento del espectro de respuesta. Se utilizó un rango de periodo de escalamiento amplio y una tolerancia normalmente estricta. De los 321 registros con  $M_w > 6.5$ , alrededor del 28% fueron escalados con éxito para cada grupo en análisis (Tabla 1). Por lo tanto, se tiene una base de datos pequeña, pero confiable de registros escalados para ser utilizados en análisis dinámicos.

No se trabajó con suelos tipo A y B ya que el número de estaciones emplazadas en dichos suelos es menor. Por otro lado, se determina una variación pequeña en la caracterización de las regiones propuestas (Tabla 4 a 6). Se debe aumentar el número de eventos en estudio, con el fin de caracterizar de mejor forma esta regionalización e incorporar registros provenientes de suelos tipo A y B para escalamiento.

Las respuestas de desplazamientos de entre piso obtenidas para todos los casos estudiados, corresponden a respuestas estructurales normales y sin anomalías. Estas respuestas para todas las ciudades en estudio y suelo tipo C, varían entre los 0.14% y 0.26% y para el suelo tipo D, varían entre los 0.18% y 0.30%.

Dado a que uno de los principales problemas con los análisis tiempo-historia es la definición de la acción sísmica a emplear, se entrega una base de datos de registros seleccionados y escalados para ser utilizados en las distintas regiones sísmicas propuestas en la Tabla 3 y suelos tipo C y D. Esto se encuentra disponible y descargable en <https://1drv.ms/f/s!AtJHHADxuadTiDjLyso6s2YcgdEM>

## 6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los profesores que colaboraron con esta investigación: Gonzalo Montalva (Universidad de Concepción), Diana Comte y Felipe Leyton (Universidad de Chile), Nelson Maureira y Diego Caamaño (Universidad Católica de la Santísima Concepción).

## 7. REFERENCIAS

- Abrahamson N.A . (1992). *Non-stationary spectral matching*. Seismological Research Letters, Vol. 63, No.1,p.30.
- Barazangui, M., & Isacks, B. (1976). *Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America*. Ithaca, New York 14853: Department of Geological Sciences, Cornell University.
- Barrientos, S. (1980). *Regionalización macrosísmica para la evaluación del riesgo sísmico en Chile*. Tesis de Magíster en Ciencias (Inédito). Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil: 35p.
- Bastías, & Montalva. (2015). Chile Strong Ground Motion Flatfile. *Earthquake Spectra*.
- Chan, S. M., Ruiz, S. E., & Montiel, M. A. (2005). Escalamiento de acelerogramas y número mínimo de registros requeridos para el análisis de estructuras. *Revista de Ingeniería Sísmica*.
- Computers and Structures. (2015). *Reference Manual*. CSI.

- Cortés-Aranda, J., González, G., Rémy, D., & Martinod, J. (2015). *Normal upper plate fault reactivation in northern Chile and the subduction earthquake cycle: From geological observations and static Coulomb Failure Stress (CFS) change*. *Tectonophysics* 639, 118-131.
- COSMOS. (2016). *The Consortium of Organization for Strong-Motion Observation*. Obtenido de <http://www.cosmos-eq.org/>
- CSN. (2016). *Centro Sismológico Nacional*. Obtenido de Universidad de Chile: <http://evtdb.csn.uchile.cl/>
- Gajardo, E., & Lomnitz, C. (1960). Seismic provinces of Chile. *In Proceeding of the Second World Conference on Earthquake Engineering*.
- Giardini, D., & Basham, P. (1999). *Global seismic hazard assessment program (GSHAP)*. Obtenido de <http://www.seismo.ethz.ch/static/gshap/index.html>
- Hancock J; Watson-Lamprey J; Abrahamson N.A; Bommer J.J; Markatis A; McCoy E; Mendis R. (2006). *An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets*. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 10 pp. 67-89.
- Hernández, M., & Mercado, O. (2015). *Diseño y aplicación de códigos en Matlab para cálculo de parámetros dinámicos en análisis sísmicos de suelo y estructuras*. Managua, Nicaragua: Investigación Monográfica para obtener el título de Ingeniero Civil.
- Labbe, J. (1964). *Relaciones macrosísmicas para la evaluación del riesgo sísmico en Chile y California*. Memoria de Título. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil: 35p.
- Leguísamo, U., & Geovanny, M. (2016). *Métodos de Escalamiento de Registros Sísmicos para Diseño de Estructuras con Aislación. Evaluación y Propuesta*. Guayaquil, Ecuador: Proyecto de Investigación previo a la obtención del Título de: Ingeniero Civil.
- Mahmoud M. Hachem, Neville J. Mathias, Ya Yong Wang, Peter Fajfar, Keh-Chyuan Tsai, Jason M. Ingham, Claudio A. Oyarzo-Vera, Sam Lee. (2010). *An International Comparison Of Ground Motion Selection Criteria For Seismic Design*. Codes in Structural Engineering, Topic 1.2: Comparison of Codes. Dubrovnik, Croatia.
- Martin, A. (1990). *Hacia una nueva regionalización y cálculo del peligro sísmico en Chile*. Memoria de Título (Inédito). Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil: 132p.
- Martinez, J. (2002). *Análisis de la teoría de ondículas orientada a las aplicaciones en ingeniería eléctrica: Fundamentos*. Cap.2 Análisis de señales utilizando la transformada Wavelet. E.T.S.I Industriales, Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- NCh 1537. (2009). *Diseño estructural - Cargas permanentes y cargas de uso*. Norma Chilena Oficial. Instituto Nacional de Normalización.
- NCh 433. (2009). *Diseño Sísmico de Edificios*. Norma Chilena Oficial. Instituto Nacional de Normalización.

- Núñez, I., Boroček, R., Comte, D., & Contreras, V. (2015). *Nuevo Peligro Sísmico para Chile*. XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINSA 2015. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Oyarzo, C., & Chouw, N. (2008). *Comparison of record scaling methods proposed by standards currently applied in different countries*. The 14 th World Conference on Earthquake Engineering. Department of Civil and Environmental Engineering, the University of Auckland. New Zealand.
- Oyarzo, C., McVerry, G., & Ingham, J. (2010). *Seismic Zonation and Default Suite of Ground-Motion Records for Time-History Analysis in the North Island of New Zealand*. Earthquake Spectra. Earthquake Engineering Research Institute.
- Ramirez, D. (2015). *Aplicación de la Transformada Wavelet para generar acelerogramas artificiales compatibles con el espectro de diseño de la NSR-10*. Pontificia Universidad Javeriana, Cali.
- RENADIC. (2016). *Terremotos de Chile*. Obtenido de <http://terremotos.ing.uchile.cl/>
- Ruiz, S., & Madarlaga, R. (2012). Simogénesis, proceso de ruptura y réplicas del mega terremoto del Maule 2010. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Santibáñez, O. (2013). *Evaluación del peligro sísmico uniforme en la región de los ríos usando enfoques probabilista y determinista*. Valdivia, Chile: Tesis para optar al Título de: Ingeniero Civil en Obras Civiles.
- Seismosoft. (2016). *SeismoMatch 2016 - A computer program for spectrum matching of earthquake records*. Obtenido de <http://www.seismosoft.com>
- Silva, N. (2008). *Caracterización y determinación del peligro sísmico en la Región Metropolitana*. Tesis Ing. Civil. Santiago, Universidad de Chile: 148p.
- Susa, D. (2004). *Evaluación del peligro sísmico asociado a sismos de tipo interplaca en Chile y sur del Perú utilizando una distribución bi-paramétrica de Weibull*. Memoria de Título (Inédito). Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil: 35p.
- Welkner, P. (1964). *Estudio de la sismicidad en Chile y su aplicación al cálculo antisísmico*. Memoria de Título. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil: 67p.