

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE ESCUELA DE INGENIERIA

## PROPUESTA DE FORMAS ESPECTRALES PARA LAS NORMAS CHILENAS DE DISEÑO SÍSMICO

## ADAD ABIMAEL GUERRERO LOREDO

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería

**Profesor Supervisor:** 

DIEGO LÓPEZ-GARCÍA GONZÁLEZ

Santiago de Chile, (junio, 2018) © 2018, Adad Abimael Guerrero Loredo



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE ESCUELA DE INGENIERIA

## PROPUESTA DE FORMAS ESPECTRALES PARA LAS NORMAS CHILENAS DE DISEÑO SÍSMICO

## ADAD ABIMAEL GUERRERO LOREDO

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

DIEGO LÓPEZ-GARCÍA GONZÁLEZ JORGE CREMPIEN DE LA CARRERA GONZALO MONTALVA ALVARADO JAIME NAVON COHEN

Para completar las exigencias del grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Santiago de Chile, (junio, 2018)

(A mis Padres por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, por su apoyo incondicional tanto en mi educación como en la vida.)

#### AGRADECIMIENTOS

Durante estos años de formación académica a nivel magíster son varias las personas e instituciones que han participado, de manera directa o indirecta, en la elaboración de este trabajo.

Quisiera agradecer en primer lugar a Dios por permitirme llegar a dónde estoy. Agradecimientos a mi familia por el apoyo incondicional y ser el pilar fundamental de mi formación académica y personal.

Quisiera agradecer a los profesores que fueron parte de mi formación durante estos años y agradecer en especial al profesor Diego López-García por su valiosa guía, aporte de ideas y conocimientos que hicieron posible la elaboración de este trabajo.

Agradecimientos a la Agencia de Cooperación Internacional de Chile (AGCI) por otorgarme el apoyo económico necesario para poder culminar mis estudios de magíster.

Agradecimientos al Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDEF) por el aporte del ordenador que hizo posible la realización de este trabajo.

Agradecimientos al profesor Gonzalo Montalva por proporcionar los registros sísmicos corregidos de los terremotos del año 2010 en adelante.

### **INDICE GENERAL**

DED		
	ICATC	JRIA
AGR	ADEC	IMIENTOSiii
INDI	CE DE	vii
INDI	CE DE	FIGURAS x
RESU	JMEN	xix
ABS	TRAC	Г хх
1	INTR	ODUCCIÓN1
	1.1. N	Aotivación 1
	1	.1.1. Espectros de diseño 1
	1	.1.2. Clasificación sísmica del terreno de fundación
	1	.1.3. Clasificación propuesta por la SOCHIGE
	1.2. H	Iipótesis 6
	1.3. (	Objetivos7
2	1.4. N	Aetodología
2	DASE	DE DATOS
	2.1 F	<sup>3</sup> uentes
	2.2 0	Características de los registros sísmicos12
2	2.3 (	Contenido
,	DETE	
3	DETE	RMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ESPECTRALES
3	DETE 3.1 <b>C</b>	CRMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ESPECTRALES       28         Construcción de los espectros de respuesta       28
3	DETE 3.1 ( 3.2 (	CRMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ESPECTRALES       28         Construcción de los espectros de respuesta       28         Consideración de la direccionalidad       30
3	DETE 3.1 ( 3.2 ( 3.3 A	CRMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ESPECTRALES       28         Construcción de los espectros de respuesta       28         Consideración de la direccionalidad       30         Ajuste del espectro de diseño tipo Newmark-Hall       32
4	DETE 3.1 ( 3.2 ( 3.3 A ANÁI	CRMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ESPECTRALES       28         Construcción de los espectros de respuesta       28         Consideración de la direccionalidad       30         Ajuste del espectro de diseño tipo Newmark-Hall       32         LISIS DE GRUPOS DE REGISTROS SÍSMICOS       35
4	DETE 3.1 ( 3.2 ( 3.3 A ANÁI 4.1 M	CRMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ESPECTRALES       28         Construcción de los espectros de respuesta       28         Consideración de la direccionalidad       30         Ajuste del espectro de diseño tipo Newmark-Hall       32         LISIS DE GRUPOS DE REGISTROS SÍSMICOS       35         Metodologías de clasificación de suelos (casos de estudio)       35
4	DETE 3.1 C 3.2 C 3.3 A ANÁI 4.1 M	CRMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ESPECTRALES       28         Construcción de los espectros de respuesta       28         Consideración de la direccionalidad       30         Ajuste del espectro de diseño tipo Newmark-Hall       32         LISIS DE GRUPOS DE REGISTROS SÍSMICOS       35         Metodologías de clasificación de suelos (casos de estudio)       35         -1.1       Grupos de registros según la Clasificación Actual de suelos       38
4	DETE 3.1 ( 3.2 ( 3.3 A ANÁI 4.1 M 4	CRMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ESPECTRALES28Construcción de los espectros de respuesta28Consideración de la direccionalidad30Ajuste del espectro de diseño tipo Newmark-Hall32LISIS DE GRUPOS DE REGISTROS SÍSMICOS35Metodologías de clasificación de suelos (casos de estudio)354.1.1Grupos de registros según la Clasificación Actual de suelos384.1.2Grupos de registros según la Clasificación SOCHIGE39
4	DETE 3.1 ( 3.2 ( 3.3 A ANÁI 4.1 M 4 4 4	CRMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ESPECTRALES28Construcción de los espectros de respuesta28Consideración de la direccionalidad30Ajuste del espectro de diseño tipo Newmark-Hall32LISIS DE GRUPOS DE REGISTROS SÍSMICOS35Metodologías de clasificación de suelos (casos de estudio)354.1.1Grupos de registros según la Clasificación Actual de suelos384.1.2Grupos de registros según la Clasificación SOCHIGE394.1.3Grupos de registros clasificando el suelo considerando únicamente el
4	DETE 3.1 ( 3.2 ( 3.3 A ANÁI 4.1 M 4 4	CRMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ESPECTRALES       28         Construcción de los espectros de respuesta       28         Consideración de la direccionalidad       30         Ajuste del espectro de diseño tipo Newmark-Hall       32         LISIS DE GRUPOS DE REGISTROS SÍSMICOS       35         Metodologías de clasificación de suelos (casos de estudio)       35         4.1.1 Grupos de registros según la Clasificación Actual de suelos       38         4.1.2 Grupos de registros según la Clasificación SOCHIGE       39         4.1.3 Grupos de registros clasificando el suelo considerando únicamente el valor de V <sub>s30</sub>
4	DETE 3.1 ( 3.2 ( 3.3 A ANÁI 4.1 M 4 4 4 4	CRMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ESPECTRALES       28         Construcción de los espectros de respuesta       28         Consideración de la direccionalidad       30         Ajuste del espectro de diseño tipo Newmark-Hall       32         LISIS DE GRUPOS DE REGISTROS SÍSMICOS       35         Metodologías de clasificación de suelos (casos de estudio)       35         4.1.1 Grupos de registros según la Clasificación Actual de suelos       38         4.1.2 Grupos de registros según la Clasificación SOCHIGE       39         4.1.3 Grupos de registros clasificando el suelo considerando únicamente el valor de V <sub>s30</sub>
4	DETE 3.1 ( 3.2 ( 3.3 A ANÁI 4.1 N 4 4 4 4	RMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ESPECTRALES       28         Construcción de los espectros de respuesta       28         Consideración de la direccionalidad       30         Ajuste del espectro de diseño tipo Newmark-Hall       32         LISIS DE GRUPOS DE REGISTROS SÍSMICOS       35         Metodologías de clasificación de suelos (casos de estudio)       35         4.1.1 Grupos de registros según la Clasificación Actual de suelos       38         4.1.2 Grupos de registros según la Clasificación SOCHIGE       39         4.1.3 Grupos de registros clasificando el suelo considerando únicamente el valor de V <sub>s30</sub> 40         4.1.4 Grupos de registros clasificando el suelo considerando únicamente el valor de T <sub>0</sub> 44

	4.3	Construcción de la forma espectral de Newmark-Hall de un grupo de registros
_		53
5	DES	CRIPCION Y ANALISIS DE RESULTADOS56
	5.1	Formas espectrales utilizando la Clasificación Actual de suelos
		5.1.1 Todo Chile
		5.1.2 Zona central de Chile
		5.1.3 Comparación con los espectros de la normativa actual
	5.2	Formas espectrales utilizando la Clasificación SOCHIGE
		5.2.1 Todo Chile
		5.2.2 Zona central de Chile
		5.2.3 Comparación con los espectros de la normativa actual
	5.3	Formas espectrales utilizando el valor de $V_{\rm s30}como$ parámetro de clasificación
		del suelo
		5.3.1 Todo Chile
		5.3.2 Zona central de Chile
	5.4	Formas espectrales utilizando el valor de T <sub>0</sub> como parámetro de clasificación
		del suelo
		5.4.1 Todo Chile
6	PRO	5.4.1 Zona central de Chile
	6.1	Determinación de los parámetros espectrales
	6.2	Forma espectral propuesta
	6.3	Comparaciones con otras formas espectrales
7	CON	NCLUSIONES
BIBL	log	RAFIA 111
AN	ΕXC	O S 113
Anex	o A:	Lista de registros de la base de datos. Información obtenida de Bastías y
	Mon	talva (2016)
Anex	o B:	Programa para la construcción de espectros de respuesta de desplazamiento y
	pseu	do-aceleración (Elaboración propia)
	- D 1 I	Función nora receluer la consción del movimiente modiente la solución evecto.
	D.11	runcion para resolver la ecuación del movilmento mediante la solución exacta.
Anex	o C:	Programa para ajustar el espectro de diseño de newmark-Hall a un espectro de
	reco	uesta de pseudo-aceleración (Flaboración propia)
	resh	testa de pseudo acciención (Liaboración propia)

(	C.1 Función para realizar el ajuste al espectro de desplazamiento 1	32
( Anexo	C.2 Función para realizar el ajuste al espectro de pseudo-aceleración 1 o D: Formas espectrales obtenidas del análisis del valor de V <sub>s30</sub> como paráme	.33 tro de
C	caracterización de suelo 1	.34
Ι	D.1 Registros de todo Chile 1	34
I Anexo	<ul> <li>D.2 Registros de la zona central de Chile</li></ul>	.39 tro de
C	caracterización de suelo 1	42
I	E.1 Registros de todo Chile 1	42
I	E.2 Registros de la zona central de Chile 1	49

#### **INDICE DE TABLAS**

Pág.
Tabla 1-1. Clasificación sísmica del suelo de fundación del DS61/20115
Tabla 1-2. Propuesta de clasificación sísmica del terreno de fundación (julio de 2017)6
Tabla 2-1. Lista de estaciones consideradas en la base de datos. Información obtenida de
Bastías y Montalva (2016)
Tabla 2-2. Lista de eventos sísmicos considerados en la base de datos. Información
obtenida de Bastías y Montalva (2016)25
Tabla 4-1. Condiciones que deben cumplir las estaciones en cada caso de estudio y
número de registros utilizados
Tabla 4-2. Número de estaciones y de registros por cada tipo de suelo según la
Clasificación Actual (registros obtenidos en todo Chile)
Tabla 4-3. Número de estaciones y de registros por cada tipo de suelo según la
Clasificación Actual (registros obtenidos en la zona central de Chile)
Tabla 4-4. Número de estaciones y de registros por cada tipo de suelo según la
Clasificación SOCHIGE (registros obtenidos en todo Chile)
Tabla 4-5. Número de estaciones y de registros por cada tipo de suelo según la
Clasificación SOCHIGE (registros obtenidos en la zona central de Chile)40
Tabla 4-6. Lista de registros utilizados para el caso de estudio 3 ordenados por valor de
$V_{s30}$ en forma descendente (registros obtenidos en la zona central de Chile)42
Tabla 4-7. Número de estaciones y de registros por grupo, clasificando en función del
valor de $V_{s30}$ (registros obtenidos en todo Chile)
Tabla 4-8. Número de estaciones y de registros por grupo, clasificando en función del
valor de $V_{s30}$ (registros obtenidos en la zona central de Chile)44
Tabla 4-9. Lista de registros utilizados para el caso de estudio 4 ordenados por valor de
T <sub>0</sub> en forma ascendente (registros obtenidos en la zona central de Chile)45
Tabla 4-10. Número de estaciones y de registros por grupo, clasificando en función del
valor de $T_0$ (registros obtenidos en todo el territorio chileno)46

Tabla 4-11. Número de estaciones y de registros por grupo, clasificando en función del
valor de T <sub>0</sub> (registros obtenidos en la zona central de Chile)49
Tabla 5-1. Parámetros espectrales: registros obtenidos en todo Chile, Clasificación
Actual, sin direccionalidad57
Tabla 5-2. Parámetros espectrales: registros obtenidos en todo Chile, Clasificación
Actual, con direccionalidad58
Tabla 5-3. Parámetros espectrales: registros obtenidos sólo en la zona central de Chile,
Clasificación Actual, sin direccionalidad64
Tabla 5-4. Parámetros espectrales: registros obtenidos sólo en la zona central de Chile,
Clasificación Actual, con direccionalidad64
Tabla 5-5. Parámetros espectrales: registros obtenidos en todo Chile, Clasificación
SOCHIGE, sin direccionalidad74
Tabla 5-6. Parámetros espectrales: registros obtenidos en todo Chile, Clasificación
SOCHIGE, con direccionalidad75
Tabla 5-7. Parámetros espectrales: registros obtenidos sólo en la zona central de Chile,
Clasificación SOCHIGE, sin direccionalidad81
Tabla 5-8. Parámetros espectrales: registros obtenidos sólo en la zona central de Chile,
Clasificación SOCHIGE, con direccionalidad81
Tabla 6-1. Parámetros espectrales para un Suelo Tipo C según distintas clasificaciones
de suelos
Tabla 6-2. Parámetros espectrales obtenidos en cada caso de estudio y valores
propuestos para un Suelo Tipo A101
Tabla 6-3. Parámetros espectrales obtenidos en cada caso de estudio y valores
propuestos para un Suelo Tipo B102
Tabla 6-4. Parámetros espectrales obtenidos en cada caso de estudio y valores
propuestos para un Suelo Tipo C
Tabla 6-5. Parámetros espectrales obtenidos en cada caso de estudio y valores
propuestos para un Suelo Tipo D102

Tabla 6-6. Parámetros espectrales obtenidos en cada caso de estudio y valores	
propuestos para un Suelo Tipo E	103
Tabla 6-7. Parámetros espectrales propuestos.	104

#### **INDICE DE FIGURAS**

Figura 1-1. Espectros de diseño para un suelo firme en Santiago según las distintas
normas chilenas de diseño sísmico (I=1, R=1)2
Figura 1-2. Forma espectral de diseño de Newmark-Hall
Figura 1-3. Forma espectral de diseño de la NCh433 + DS61/2011
Figura 1-4. Forma espectral de Newmark-Hall en representación trilogarítmica (Chopra,
2012)
Figura 2-1. Número de registros en cada estación12
Figura 2-2. Ubicación de las estaciones sísmicas14
Figura 2-3. Ubicación de los epicentros de los eventos sísmicos
Figura 2-4. Número de registros en cada año16
Figura 2-5. Número de eventos en cada año16
Figura 2-6. Magnitud de los eventos sísmicos
Figura 2-7. Magnitud y fecha de los eventos sísmicos considerados en la base de datos.
Figura 3-1. Espectros de respuesta de desplazamiento de las componentes horizontales
de registro 20148 captado por la estación LACH durante el terremoto del Maule en
2010
Figura 3-2. Espectros de respuesta de pseudo-aceleración las componentes horizontales
de registro 20148 captado por la estación LACH durante el terremoto del Maule en
2010
Figura 3-3. Direccionalidad de la ordenada espectral de pseudo-aceleración para un
periodo natural igual a 0.2 s (registro 20148 captado por la estación LACH durante el
terremoto del Maule en 2010)
Figura 3-4. Direccionalidad del espectro de respuesta de pseudo-aceleración (registro
20148 captado por la estación LACH durante el terremoto del Maule en 2010)

Figura 3-5. Ajuste del espectro de diseño tipo Newmark-Hall a un espectro de respuesta
de desplazamiento (componente NS del registro 20148 captado por la estación LACH
durante el terremoto del Maule en 2010)
Figura 3-6. Ajuste del espectro de diseño tipo Newmark-Hall a un espectro de respuesta
de pseudo-aceleración (componente NS del registro 20148 captado por la estación
LACH durante el terremoto del Maule en 2010)
Figura 4-1. Ejemplo de curva H/V sin un valor de periodo predominante bien definido
(curva tipo plana)
Figura 4-2. Ejemplo de curva H/V con un valor de periodo predominante bien definido
(curva tipo punto máximo)
Figura 4-3. Grupo de espectros de respuesta de pseudo-aceleración sin normalizar
(registros obtenidos en todo Chile correspondientes a un Suelo Tipo B según la
Clasificación Actual)
Figura 4-4. Grupo de espectros de respuesta de pseudo-aceleración normalizados por
PGV (registros obtenidos en todo Chile correspondientes a un Suelo Tipo B según la
Clasificación Actual)
Figura 4-5. Espectro Percentil 50 del grupo de espectros de respuesta de pseudo-
aceleración normalizados por PGV (registros obtenidos en todo Chile correspondientes
a un Suelo Tipo B según la Clasificación Actual)54
Figura 4-6. Espectro Percentil 50 de desplazamiento (registros obtenidos en todo Chile
correspondientes a un Suelo Tipo B según la Clasificación Actual)
Figura 4-7. Ajuste del Espectro de diseño de Newmark-Hall al espectro Percentil 50 de
desplazamiento (registros obtenidos en todo Chile correspondientes a un Suelo Tipo B
según la Clasificación Actual)
Figura 4-8. Ajuste del Espectro de diseño de Newmark-Hall al espectro Percentil 50 de
pseudo-aceleración (registros obtenidos en todo Chile correspondientes a un Suelo Tipo
B según la Clasificación Actual)

Figura 5-1. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo A. Sin
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile,
Clasificación Actual)
Figura 5-2. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo B. Sin
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile,
Clasificación Actual)
Figura 5-3. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo C. Sin
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile,
Clasificación Actual)
Figura 5-4. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo D. Sin
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile,
Clasificación Actual)60
Figura 5-5. Formas espectrales normalizadas (registros obtenidos en todo Chile,
Clasificación Actual, sin direccionalidad)60
Figura 5-6. Formas espectrales normalizadas a desplazamientos máximos iguales a 21
cm, 24 cm, 27 cm y 30 cm para Suelos Tipo A, B, C y D respectivamente (registros
obtenidos en todo Chile, Clasificación Actual, sin direccionalidad)61
Figura 5-7. Influencia de la direccionalidad: Suelo Tipo A (registros obtenidos en todo
Chile, Clasificación Actual)61
Figura 5-8. Influencia de la direccionalidad: Suelo Tipo B (registros obtenidos en todo
Chile, Clasificación Actual)62
Figura 5-9. Influencia de la direccionalidad: Suelo Tipo C (registros obtenidos en todo
Chile, Clasificación Actual)62
Figura 5-10. Influencia de la direccionalidad: Suelo Tipo D (registros obtenidos en todo
Chile, Clasificación Actual)63
Figura 5-11. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo A. Sin
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en la zona central de
Chile, Clasificación Actual)

Figura 5-12. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo B. Sin
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en la zona central de
Chile, Clasificación Actual)65
Figura 5-13. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo C. Sin
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en la zona central de
Chile, Clasificación Actual)66
Figura 5-14. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo D. Sin
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en la zona central de
Chile, Clasificación Actual)
Figura 5-15. Influencia de la zona considerada: Suelo Tipo A (Clasificación Actual, sin
direccionalidad)67
Figura 5-16. Influencia de la zona considerada: Suelo Tipo B (Clasificación Actual, sin
direccionalidad)67
Figura 5-17. Influencia de la zona considerada: Suelo Tipo C (Clasificación Actual, sin
direccionalidad)68
Figura 5-18. Influencia de la zona considerada: Suelo Tipo D (Clasificación Actual, sin
direccionalidad)68
Figura 5-19. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo A sin
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile,
Clasificación Actual)70
Figura 5-20. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo B sin
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile,
Clasificación Actual)
Figura 5-21. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo C sin
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile,
Clasificación Actual)71
Figura 5-22. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo D sin
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile,
Clasificación Actual)71

Figura 5-23. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo A sin	
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona cen	tral
de Chile, Clasificación Actual).	72
Figura 5-24. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo B sin	
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona cen	tral
de Chile, Clasificación Actual)	72
Figura 5-25. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo C sin	
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona cen	tral
de Chile, Clasificación Actual).	73
Figura 5-26. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo D sin	
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona cen	tral
de Chile, Clasificación Actual).	73
Figura 5-27. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo A. Sin	
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile,	
Clasificación SOCHIGE).	75
Figura 5-28. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo B. Sin	
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile,	
Clasificación SOCHIGE)	76
Figura 5-29. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo C. Sin	
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile,	
Clasificación SOCHIGE).	76
Figura 5-30. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo D. Sin	
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile,	
Clasificación SOCHIGE).	77
Figura 5-31. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo E. Sin	
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile,	
Clasificación SOCHIGE).	77
Figura 5-32. Formas espectrales normalizadas (registros obtenidos en todo Chile,	
Clasificación SOCHIGE, sin direccionalidad)	78

en todo Chile, sin direccionalidad)	Figura 5-33. Influencia de la clasificación de suelo: Suelo Tipo A (registros obtenidos
Figura 5-34. Influencia de la clasificación de suelo: Suelo Tipo B (registros obtenidos         en todo Chile, sin direccionalidad).	en todo Chile, sin direccionalidad)79
en todo Chile, sin direccionalidad)	Figura 5-34. Influencia de la clasificación de suelo: Suelo Tipo B (registros obtenidos
Figura 5-35. Influencia de la clasificación de suelo: Suelo Tipo C (registros obtenidos         en todo Chile, sin direccionalidad).       80         Figura 5-36. Influencia de la clasificación de suelo: Suelo Tipo D (registros obtenidos       80         Figura 5-36. Influencia de la clasificación de suelo: Suelo Tipo D (registros obtenidos       80         Figura 5-37. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo A. Sin       80         direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central       82         Figura 5-38. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo B. Sin       82         direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central       82         Figura 5-39. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo C. Sin       82         figura 5-39. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo C. Sin       83         direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central       83         Figura 5-40. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo D. Sin       83         figura 5-41. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo D. Sin       83         figura 5-41. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo D. Sin       83         figura 5-42. Comparación SOCHIGE)       83         Figura 5-42. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo A sin       84     <	en todo Chile, sin direccionalidad)79
en todo Chile, sin direccionalidad)	Figura 5-35. Influencia de la clasificación de suelo: Suelo Tipo C (registros obtenidos
Figura 5-36. Influencia de la clasificación de suelo: Suelo Tipo D (registros obtenidos         en todo Chile, sin direccionalidad).       80         Figura 5-37. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo A. Sin       81         direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central       82         Figura 5-38. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo B. Sin       82         direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central       82         Figura 5-38. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo B. Sin       82         Figura 5-39. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo C. Sin       82         Figura 5-39. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo C. Sin       83         direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central       83         Figura 5-40. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo D. Sin       83         figura 5-41. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo D. Sin       83         figura 5-41. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo E. Sin       83         figura 5-41. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo E. Sin       84         figura 5-42. Comparación con los espectros obtenidos sólo en la zona central       84         Figura 5-42. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo A sin	en todo Chile, sin direccionalidad)80
en todo Chile, sin direccionalidad)	Figura 5-36. Influencia de la clasificación de suelo: Suelo Tipo D (registros obtenidos
Figura 5-37. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo A. Sin         direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central         de Chile, Clasificación SOCHIGE).       82         Figura 5-38. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo B. Sin       direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central         de Chile, Clasificación SOCHIGE).       82         Figura 5-39. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo C. Sin       82         figura 5-39. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo C. Sin       83         direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central       83         Figura 5-40. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo D. Sin       83         direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central       83         figura 5-41. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo E. Sin       83         figura 5-42. Comparación SOCHIGE).       84         Figura 5-42. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo A sin       84         figura 5-43. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo A sin       85         figura 5-43. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo B sin       85         Figura 5-43. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo B sin       85	en todo Chile, sin direccionalidad)80
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central de Chile, Clasificación SOCHIGE)	Figura 5-37. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo A. Sin
de Chile, Clasificación SOCHIGE)	direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central
Figura 5-38. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo B. Sin         direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central         de Chile, Clasificación SOCHIGE).       82         Figura 5-39. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo C. Sin       81         direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central       83         Figura 5-40. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo D. Sin       83         figura 5-40. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo D. Sin       83         direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central       83         Figura 5-41. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo E. Sin       83         Figura 5-41. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo E. Sin       84         Gireccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central       84         Figura 5-42. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo A sin       85         Figura 5-43. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo B sin       85         Figura 5-43. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo B sin       85         Figura 5-43. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo B sin       85         Figura 5-43. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo B sin       85 <t< td=""><td>de Chile, Clasificación SOCHIGE)82</td></t<>	de Chile, Clasificación SOCHIGE)82
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central de Chile, Clasificación SOCHIGE)	Figura 5-38. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo B. Sin
de Chile, Clasificación SOCHIGE)	direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central
Figura 5-39. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo C. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central de Chile, Clasificación SOCHIGE)	de Chile, Clasificación SOCHIGE)82
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central de Chile, Clasificación SOCHIGE)	Figura 5-39. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo C. Sin
de Chile, Clasificación SOCHIGE)	direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central
Figura 5-40. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo D. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central de Chile, Clasificación SOCHIGE)	de Chile, Clasificación SOCHIGE)
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central de Chile, Clasificación SOCHIGE)	Figura 5-40. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo D. Sin
de Chile, Clasificación SOCHIGE)	direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central
Figura 5-41. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo E. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central de Chile, Clasificación SOCHIGE)	de Chile, Clasificación SOCHIGE)
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central de Chile, Clasificación SOCHIGE)	Figura 5-41. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo E. Sin
de Chile, Clasificación SOCHIGE)	direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central
<ul> <li>Figura 5-42. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo A sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación SOCHIGE)</li></ul>	de Chile, Clasificación SOCHIGE)
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación SOCHIGE)	Figura 5-42. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo A sin
Clasificación SOCHIGE)	direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile,
Figura 5-43. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo B sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación SOCHIGE)	Clasificación SOCHIGE)
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación SOCHIGE)	Figura 5-43. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo B sin
Clasificación SOCHIGE)	direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile,
	Clasificación SOCHIGE)

Figura 5-44. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo C sin
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile,
Clasificación SOCHIGE)
Figura 5-45. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo D sin
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile,
Clasificación SOCHIGE)
Figura 5-46. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo E sin
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile,
Clasificación SOCHIGE)
Figura 5-47. Relación entre el valor de $V_{s30}$ y el periodo T <sub>c</sub> . Sin direccionalidad(a) y con
direccionalidad (b)
Figura 5-48. Relación entre el valor de $V_{s30}$ y el factor de amplificación $\alpha_A$ . Sin
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b)
Figura 5-49. Relación entre el valor de $V_{s30}$ y la razón $T_c/T_b$ . Sin direccionalidad(a) y
con direccionalidad (b)
Figura 5-50. Relación entre el valor de $V_{s30}$ y el periodo $T_d$ . Sin direccionalidad(a) y con
direccionalidad (b)
Figura 5-51. Relación entre el valor de $V_{s30}$ y el periodo T <sub>c</sub> . Sin direccionalidad(a) y con
direccionalidad (b)
Figura 5-52. Relación entre el valor de $V_{s30}$ y el factor de amplificación $\alpha_A$ . Sin
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b)91
Figura 5-53. Relación entre el valor de $V_{s30}$ y la razón T <sub>c</sub> /T <sub>b</sub> . Sin direccionalidad(a) y
con direccionalidad (b)92
Figura 5-54. Relación entre el valor de $V_{s30}$ y el periodo T <sub>d</sub> . Sin direccionalidad(a) y con
direccionalidad (b)
Figura 5-55. Relación entre el valor de $T_0$ y el periodo $T_c$ . Sin direccionalidad(a) y con
direccionalidad (b)
Figura 5-56. Relación entre el valor de T <sub>0</sub> y el factor de amplificación $\alpha_A$ . Sin
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b)94

Figura 5-57. Relación entre el valor de $T_0$ y la razón $T_c/T_b$ . Sin direccionalidad(a) y con
direccionalidad (b)95
Figura 5-58. Relación entre el valor de T <sub>0</sub> y el periodo T <sub>d</sub> . Sin direccionalidad(a) y con
direccionalidad (b)
Figura 5-59. Relación entre el valor de T <sub>0</sub> y el periodo T <sub>c</sub> . Sin direccionalidad(a) y con
direccionalidad (b)96
Figura 5-60. Relación entre el valor de T <sub>0</sub> y el factor de amplificación $\alpha_A$ . Sin
direccionalidad(a) y con direccionalidad (b)97
Figura 5-61. Relación entre el valor de T <sub>0</sub> y la razón T <sub>c</sub> /T <sub>b</sub> . Sin direccionalidad(a) y con
direccionalidad (b)
Figura 5-62. Relación entre el valor de $T_0$ y el periodo $T_d$ . Sin direccionalidad(a) y con
direccionalidad (b)
Figura 6-1. Comparación de la forma propuesta con las formas definidas según cada
clasificación para Suelo Tipo C100
Figura 6-2. Formas espectrales propuestas. PGA obtenido con la ley de atenuación
propuesta por Montalva et al. (2017)
Figura 6-3. Comparación de la forma espectral propuesta con el espectro de Montalva et
al. (2017) para un Suelo Tipo A ( $R = 65$ km, $Mw = 8.8$ , interplaca, $Zh = 390$ km, $Vs30$
= 1200 m/s, $\epsilon$ = 0)
Figura 6-4. Comparación de la forma espectral propuesta con el espectro de Montalva et
al. (2017) para un Suelo Tipo B ( $R = 65$ km, $Mw = 8.8$ , interplaca, $Zh = 390$ km, $Vs30$
= 700 m/s, $\epsilon$ = 0)
Figura 6-5. Comparación de la forma espectral propuesta con el espectro de Montalva et
al. (2017) para un Suelo Tipo C ( $R = 65$ km, $Mw = 8.8$ , interplaca, $Zh = 390$ km, $Vs30$
$= 425 \text{ m/s}, \epsilon = 0$ )
Figura 6-6. Comparación de la forma espectral propuesta con el espectro de Montalva et
al. (2017) para un Suelo Tipo D ( $R = 65$ km, $Mw = 8.8$ , interplaca, $Zh = 390$ km, $Vs30$
$= 265 \text{ m/s}, \epsilon = 0$ )

Figura 6-7. Comparación de la forma espectral propuesta con el e	espectro de Montalva et
al. (2017) para un Suelo Tipo E ( $R = 65$ km, $Mw = 8.8$ , interplac	a, <i>Zh</i> = 390 km, <i>Vs</i> 30
$= 125 \text{ m/s}, \epsilon = 0$ )	

#### RESUMEN

En los códigos de diseño sísmico más importantes del mundo, tales como ASCE-7 en EE.UU. y Eurocode 8 en la Unión Europea, los espectros de diseño son válidos para todo tipo de estructuras. Sin embargo, en Chile las distintas normas de diseño sísmico para distintos tipos de estructuras indican distintos espectros de diseño sísmico, contradiciendo una realidad física fundamental: la amenaza sísmica depende únicamente de la ubicación geográfica del sitio y de sus características geotécnicas y no de las características de la estructura ubicada en tal sitio.

Con el fin de contribuir a la unificación de los espectros de diseño sísmico en Chile, en este trabajo se proponen formas espectrales de diseño de tipo Newmark-Hall, que es la forma espectral adoptada en prácticamente todos los países del mundo, siendo Chile probablemente la única excepción. Se estudian formas espectrales considerando la clasificación sísmica de suelos actualmente vigente en Chile para el diseño sísmico de edificios habitacionales y de oficinas (la indicada en el DS 61/2011) y la clasificación propuesta en 2017 por la SOCHIGE. Se analizan las relaciones que existen entre los parámetros espectrales de Newmark-Hall y los parámetros de caracterización del suelo (i.e. velocidad de onda de corte y periodo predominante). Los parámetros espectrales son determinados a través del análisis estadístico de los espectros de respuesta de registros sísmicos obtenidos en Chile. La aplicación de la metodología incorpora datos actualizados y conceptos más afines al estado del arte actual.

La clasificación SOCHIGE resultó en un solo cambio significativo respecto de la Clasificación Actual: Suelo Tipo C, zona de periodos cortos.

Las formas espectrales obtenidas para Suelos Tipo A y B resultan similares a las establecidas en el DS 61/2011. Sin embargo, tal similitud no se mantiene para suelos Tipo C, D y E. Estas nuevas formas espectrales podrían ser utilizadas en los códigos de diseño sísmico junto con la nueva Clasificación SOCHIGE.

Palabras Claves: espectro de diseño, Newmark-Hall, forma espectral, parámetros espectrales, clasificación de suelos, velocidad de onda de corte, periodo predominante y normas chilenas de diseño sísmico.

#### ABSTRACT

The most important seismic design codes in the world, such as ASCE 7 in the USA and Eurocode 8 in the European Union, indicate design spectra that are valid for all types of structures. However, in Chile seismic design codes for different types of structures indicate different design spectra, which contradicts a fundamental physical reality: the seismic hazard depends only on the location and geotechnical characteristics of the site and does not depend on the characteristics of the structure located at that site.

In order to make a contribution to the eventual unification of design spectra in Chile, in this study new Newmark-Hall spectral shapes are proposed. The Newmark-Hall spectral shape has been adopted in virtually all seismic design codes in the world, and Chile is probably the only exception.

Spectral shapes are analyzed considering the soil classification currently mandatory for the seismic design of residential and office buildings in Chile (i.e., that indicated in DS 61/2011) and also the classification proposed by SOCHIGE in 2017. The relationships between the Newmark-Hall spectral parameters and the parameters for soil characterization (i.e. shear wave velocity and fundamental period) are analyzed. The spectral parameters are characterized by statistical analysis of response spectra of strong ground motions recorded in Chile. The application of the methodology incorporates recently acquired data and scaling techniques.

The SOCHIGE soil classification resulted in a single significant change with respect to the current classification: Soil Type C, short period range.

The proposed spectral shapes are similar to those currently valid in NCh433 for Soil Types A and B but not for other soil types (i.e., C, D and E). The spectral shapes proposed in this work could be incorporated into the Chilean seismic design codes along with the new SOCHIGE soil classification.

Keywords: design spectrum, Newmark-Hall, spectral shape, spectral parameters, soil classification, shear wave velocity, fundamental soil period and Chilean seismic design codes.

#### 1 INTRODUCCIÓN

Al ser Chile un país altamente sísmico es importante la constante revisión y mejora de sus códigos de diseño sísmico. Las normas que actualmente establecen los requisitos para el diseño sísmico en Chile son la NCh2369.Of2003 (INN, 2003) para estructuras industriales; la NCh433.Of1996 Modificada en 2009 (INN, 2009) y el Decreto Supremo 61/2011 (MINVU, 2011) para estructuras convencionales habitacionales, comerciales y de oficinas; la NCh2745.Of2013 (INN, 2013) para estructuras con sistemas de aislación sísmica y la NCh3411 (INN, 2017) para edificios con sistemas de disipación de energía. En los códigos de diseño la amenaza sísmica sobre una estructura (estimación de desplazamientos, aceleraciones, fuerzas de corte, etc.) es representada mediante espectros de respuesta. Los códigos de diseño sísmico de todo el mundo establecen espectros simplificados los cuales no representan la amenaza de manera exacta sino de manera razonablemente aproximada, motivo por el cual reciben el nombre de espectros de diseño.

#### 1.1. Motivación

En las siguientes secciones se describe la actualidad de las normas chilenas de diseño sísmico en cuanto a espectros de diseño y clasificación de suelos, y se presenta una comparación con lo estipulado en otras reglamentaciones de diseño sísmico internacionales. Se mencionan algunos de los problemas que presentan los espectros de diseño de las normas chilenas y los cuestionamientos a la forma espectral y a la clasificación sísmica del suelo. Además, se aborda el tema de la nueva clasificación de suelos propuesta por la Sociedad Chilena de Geotecnia (en adelante, SOCHIGE).

#### 1.1.1. Espectros de diseño

En algunos de los códigos de diseño sísmico más importantes del mundo, tales como ASCE-7 (ASCE, 2011) en Estados Unidos y Eurocode 8 (CEN, 2004) en la Unión Europea, los espectros de diseño son válidos para todo tipo de estructuras. Sin embargo, en Chile las distintas normas de diseño sísmico para distintos tipos de estructuras indican distintos espectros de diseño sísmico, contradiciendo una realidad física fundamental: la amenaza sísmica depende únicamente de la ubicación geográfica del sitio y de sus características geotécnicas (i.e. propiedades del suelo), y no de las características de la estructura ubicada en tal sitio. En otras palabras, la presencia de estructuras en un sitio dado no influye en nada en el nivel de amenaza sísmica en el sitio.



Figura 1-1. Espectros de diseño para un suelo firme en Santiago según las distintas normas chilenas de diseño sísmico (I=1, R=1).

Como consecuencia de la inexistencia de espectros de diseño únicos, distintos tipos de estructuras ubicadas en un mismo sitio son diseñadas para distintos niveles de amenaza, lo cual no es consecuente con la realidad física mencionada en el párrafo anterior. A modo de ejemplo, en la Figura 1-1 se muestran los espectros de diseño (según distintas normas chilenas) para estructuras ubicadas en Santiago (i.e. Zona Sísmica 2) y fundadas en suelo firme.

#### 1.1.1.1 Forma espectral

Los códigos de diseño sísmico de prácticamente todos los países del mundo establecen espectros de diseño que tienen la forma espectral de Newmark-Hall (1982). La Figura 1-2 muestra en escala aritmética dicha forma espectral, la cual está definida por rangos de periodos en los cuales las respuestas de pseudo-aceleración, pseudo-velocidad y desplazamiento son constantes e iguales a la aceleración, velocidad y desplazamiento

máximos del suelo (i.e. PGA, PGV y PGD) multiplicados por respectivos factores de amplificación (i.e.  $\alpha_A$ ,  $\alpha_V$ , y  $\alpha_D$ ,). Una excepción (probablemente la única) es la normativa sísmica chilena de edificios habitacionales, comerciales y de oficinas (i.e. NCh433 + DS61/2011), en donde los espectros de diseño no tienen la forma espectral de Newmark-Hall sino una forma propia (Figura 1-3) que fue definida de manera esencialmente empírica en las primeras versiones de la norma en base a la muy limitada información disponible en su momento. El principal problema de esta forma espectral propia es que no permite incorporar los últimos avances en caracterización de suelos, como por ejemplo el hecho de que en la zona de periodos largos la respuesta de desplazamiento aumenta monotónicamente a medida que disminuye la rigidez del suelo. Es importante mencionar que los espectros de la norma NCh2745 son los únicos que tienen la forma espectral de Newmark-Hall adoptada en prácticamente todos los códigos de diseño sísmico del mundo; y los espectros de la NCh2369 tienen la forma de Newmark-Hall simplificada (i.e., se asume que la zona de velocidad constante también es válida en períodos muy cortos). Por su parte, la nueva norma de diseño sísmico para estructuras equipadas con sistemas de disipación de energía NCh3411 adopta espectros de diseño de la NCh2745 para algunos tipos de suelo más firmes y el espectro de respuesta de desplazamiento del DS61/2011 para el tipo de suelo más flexible (espectro que en el DS61/2011 sólo se usa para determinar si es necesario confinar los elementos de borde de muros de hormigón armado).

Quizá más importante que lo descrito anteriormente, no existen documentos (de ningún tipo) que justifiquen los espectros de diseño de las distintas normas chilenas. En consecuencia, no es posible evaluar si la metodología adoptada fue correcta o no, y si no lo fue no es posible proponer modificaciones. Menos posible aún es determinar racionalmente si los espectros de diseño son consecuentes con los objetivos de las normas (e.g. grado de seguridad de las estructuras, etc.).



Figura 1-2. Forma espectral de diseño de Newmark-Hall.



Periodo [s]

Figura 1-3. Forma espectral de diseño de la NCh433 + DS61/2011.

#### 1.1.2. Clasificación sísmica del terreno de fundación

En la normativa chilena la clasificación sísmica del terreno de fundación se realiza principalmente en función del parámetro  $V_{s30}$ , que es la velocidad de onda de corte equivalente de los 30 metros superiores de terreno. Principalmente (pero no

exclusivamente) en función del valor de este parámetro se definen los seis tipos de suelo indicados en la Tabla 1-1. El parámetro  $V_{s30}$  también es muy importante en los sistemas de clasificación de suelos indicados en códigos de diseño sísmico internacionales tales como ASCE-7 y Eurocode 8. Sin embargo, su uso como principal indicador del tipo de suelo ha sido cuestionado en investigaciones anteriores (e.g. Rivera, 2015), en donde se encontró que el parámetro  $V_{s30}$  no tiene correlación aparente con los parámetros espectrales de Newmark-Hall.

Es importante mencionar que la clasificación de suelos de la NCh2369 no coincide con la clasificación de suelos de las demás normas.

Suelo Tipo		V <sub>s30</sub> (m/s)
А	Roca, suelo cementado	≥ 900
В	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500
С	Suelo denso, o firme	≥ 350
D	Suelo medianamente denso o firme	≥ 180
E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana	< 180
F	Suelos Especiales	

Tabla 1-1. Clasificación sísmica del suelo de fundación del DS61/2011.

#### 1.1.3. Clasificación propuesta por la SOCHIGE

En julio de 2017 la Sociedad Chilena de Geotecnia presentó una propuesta de clasificación sísmica de suelos donde además del valor de  $V_{s30}$  se plantea el uso del periodo fundamental de vibración del suelo  $T_0$  evaluado según el Método de Nakamura (1989) debido a que se trata de un parámetro que proporciona información importante acerca de la amplificación de ondas sísmicas.

La clasificación propuesta (Tabla 1-2) indica que inicialmente el suelo se clasifica en función del valor de  $V_{s30}$  para posteriormente ratificar la clasificación de suelo verificando el cumplimiento del periodo predominante. En caso de no cumplir el requisito de  $T_0$  se debe degradar el tipo de suelo en un nivel.

	Suelo Tipo	V <sub>s30</sub> (m/s)	<b>T</b> <sub>0</sub> (s)
Α	Roca, suelo cementado	$\geq$ 900	< 0.15 (o H/V plano)
В	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500	< 0.30 (o H/V plano)
C	Suelo denso o firme	≥ 350	< 0.40 (o H/V plano)
D	Suelo medianamente denso, o firme	≥180	< 1.0
E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana	< 180	

Tabla 1-2. Propuesta de clasificación sísmica del terreno de fundación (julio de 2017).

La gran mayoría de las estructuras diseñadas con las normas chilenas de diseño sísmico se han comportado de manera satisfactoria en los terremotos recientes. Por esta razón, existe amplio consenso en la comunidad chilena de ingenieros civiles estructurales y geotécnicos en que las normas chilenas de diseño sísmico son adecuadas en sus elementos esenciales, entre ellos los espectros de diseño. Aun reconociendo la importancia de la evidencia empírica, es evidente que la diversidad entre las normas chilenas de diseño sísmico es algo ilógica e inconsistente con la racionalidad esperable en códigos de diseño sísmico modernos y basados en el estado del arte actual.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, se concluye que es evidente la necesidad de unificar los espectros sísmicos de diseño de todas las normas chilenas de diseño sísmico y que como parte del enriquecimiento en el estado del arte es necesario continuar con el estudio de formas espectrales tipo Newmark-Hall que consideren distintos parámetros de caracterización del suelo (e.g.  $V_{s30}$  y  $T_0$ ).

#### 1.2. Hipótesis

Es posible, a partir del análisis de espectros de respuesta de registros sísmicos chilenos, determinar los parámetros de la forma espectral de Newmark-Hall (i.e. factores de amplificación y rangos de periodos) en función de parámetros que caracterizan la

respuesta dinámica de suelos, como por ejemplo  $V_{s30}$  (velocidad promedio de propagación de ondas de corte desde la superficie hasta 30 metros de profundidad) y  $T_0$  (periodo principal del suelo, comúnmente evaluado según el Método de Nakamura).

#### 1.3. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo consiste en aportar elementos que contribuyan a la unificación de los espectros de diseño de las normas chilenas de diseño sísmico. Se trata de determinar formas espectrales prácticas tipo Newmark-Hall que puedan ser implementadas en las normas chilenas de diseño sísmico considerando distintos tipos de suelo debidamente caracterizados mediante parámetros tales como  $V_{s30}$  y  $T_0$ . En particular, se analizan formas espectrales de diseño considerando la clasificación sísmica de suelos más reciente (la indicada en el DS61/2011, en adelante "Clasificación Actual") y considerando la clasificación de suelos propuesta por la SOCHIGE (en adelante, "Clasificación SOCHIGE"). Además se analizan espectros considerando el valor de  $V_{s30}$  y  $T_0$  por sí solos como parámetro de caracterización de suelos.

Los objetivos secundarios son: (a) comparar los espectros obtenidos en este estudio con los actuales espectros de diseño de la NCh433, teniendo en cuenta tanto la Clasificación Actual como la Clasificación SOCHIGE; y (b) comparar los espectros obtenidos considerando registros sísmicos de todo el territorio chileno con los obtenidos considerando solamente la zona del territorio continental de Chile comprendida entre San Antonio y Los Vilos.

Es importante aclarar que sólo se analizan formas espectrales; no se analizan valores de ordenadas espectrales debido a que la determinación de éstas requiere la realización de análisis de riesgo sísmico, lo cual no es parte del alcance de este trabajo.

#### 1.4. Metodología

La manera más racional de determinar espectros sísmicos de diseño consiste en analizar la amenaza mediante análisis de riesgo sísmico probabilístico (en adelante PSHA, del inglés *Probabilistic Seismic Hazard Analysis*). Desafortunadamente en Chile no hay consenso aún sobre las distintas componentes de un PSHA: por ejemplo, sobre la delimitación de las fuentes inter e intraplaca; sobre las leyes de recurrencia y de

atenuación; sobre si es necesario (y si lo es, cómo) considerar las fuentes corticales, etc. Los numerosos PSHA realizados por distintos autores, ya sea para un sitio específico o para todo el territorio chileno, arrojan resultados distintos (significativamente diferentes en muchos casos) como consecuencia de considerar distintos modelos para representar las fuentes sísmicas, distintas leyes de atenuación, etc.

Debido a los obstáculos mencionados en el párrafo anterior, se propone entonces una alternativa práctica ingenieril: el análisis estadístico de los espectros de respuesta de registros sísmicos obtenidos en Chile como metodología para determinar espectros sísmicos de diseño válidos para todas las normas. En lo esencial la metodología propuesta ya ha sido aplicada para determinar los espectros sísmicos de diseño actualmente en vigencia (información obtenida de manera informal, no existen documentos de respaldo), es válido entonces cuestionar la utilidad de volver a aplicar una metodología ya aplicada con anterioridad. En este trabajo la aplicación de la metodología incorpora datos actualizados y conceptos más afines al estado del arte actual: (a) los numerosos registros obtenidos en los últimos años, sobre todo a partir del terremoto de febrero de 2010 (cantidad muy superior a la disponible en el momento en que se definieron los espectros de diseño vigentes), relevante debido a que la caracterización de la forma espectral considera resultados de análisis estadísticos, y en consecuencia una mayor cantidad de datos permite obtener resultados más robustos y confiables; (b) criterios de agrupamiento de registros basados en las últimas técnicas de caracterización de sitio propuestas por la Sociedad Chilena de Geotecnia; y (c) técnicas más modernas de normalización de registros que permiten homogeneizar en gran medida registros obtenidos en diferentes terremotos y a distintas distancias de la fuente.

En este estudio se adopta la forma espectral de Newmark-Hall, la cual ha sido adoptada en los códigos de diseño sísmico de prácticamente todos los países del mundo. En una representación trilogarítmica la forma espectral de Newmark-Hall está dividida en siete zonas, de las cuales las cinco principales son las siguientes (Figura 1-4):

1. zona de pseudo-aceleración constante e igual a la máxima aceleración del suelo (rango de periodos:  $0 < T_n < T_a$ ),

- 2. zona de pseudo-aceleración constante e igual a  $\alpha_A$  veces la máxima aceleración del suelo (rango de periodos:  $T_b < T_n < T_c$ ),
- 3. zona de pseudo-velocidad constante e igual a  $\alpha_V$  veces la máxima velocidad del suelo (rango de periodos:  $T_c < T_n < T_d$ ),
- 4. zona de desplazamiento espectral constante e igual a  $\alpha_D$  veces el máximo desplazamiento del suelo (rango de periodos:  $T_d < T_n < T_e$ ),
- 5. zona de desplazamiento espectral constante e igual al máximo desplazamiento del suelo (rango de periodos  $T_f < T_n < \infty$ ).





# Figura 1-4. Forma espectral de Newmark-Hall en representación trilogarítmica (Chopra, 2012).

Las dos zonas restantes (i.e.  $T_a < T_n < T_b$  y  $T_e < T_n < T_f$ ) quedan definidas en función de las cinco principales mediante simples líneas rectas. En consecuencia, la forma espectral completa de Newmark-Hall (representación trilogarítmica) queda definida por los valores de los siguientes parámetros: factores  $\alpha_A$ ,  $\alpha_V$  y  $\alpha_D$  y los periodos  $T_a$ ,  $T_b$ ,  $T_c$ ,  $T_d$ ,  $T_e$  y  $T_f$ . Sin embargo, en una representación aritmética práctica (periodos entre 0.0 s y 4.0 s, Figura 1-2), la forma espectral de Newmark-Hall queda definida en función de sólo cuatro parámetros  $T_b$ ,  $T_c$ ,  $T_d$  y  $\alpha_A$ . Caracterizar una forma espectral de diseño tipo Newmark-Hall consiste entonces en determinar los valores de estos parámetros.

A continuación, se describe (de manera resumida) la metodología utilizada para obtener los parámetros espectrales que definen la forma de Newmark-Hall: (a) se construyen grupos de espectros de respuesta considerando distintas formas de clasificar el suelo, (b) los espectros agrupados son normalizados para reducir la influencia de la magnitud y la distancia, (c) de cada grupo de espectros se obtiene un espectro representativo (i.e. espectro percentil 50) al cual se le ajusta el espectro de diseño de Newmark-Hall obteniendo los parámetros espectrales que definen tal forma.

Una vez obtenidos los parámetros espectrales, se analizan las posibles relaciones entre éstos y los parámetros de caracterización del suelo. Finalmente, se analizan los resultados estadísticamente para proponer formas espectrales que podrían ser utilizados en las normas de diseño sísmico chileno.

#### **2** BASE DE DATOS

En este capítulo se describen las principales características de la base de datos de registros sísmicos chilenos recopilada para este trabajo.

La expresión "registro sísmico" o simplemente "registro" se refiere a la variación en el tiempo de la aceleración del suelo registrada por un acelerógrafo de movimiento fuerte durante un evento sísmico. Al lugar donde se encuentra un acelerógrafo se le llama "estación" y se identifica por el nombre de la localidad en donde se ubica.

Cada instrumento registra las tres componentes del movimiento del suelo (dos direcciones horizontales perpendiculares entre sí y una dirección vertical). En este proyecto se trabaja únicamente con las dos componentes horizontales: norte-sur (NS) y este-oeste (EO).

#### 2.1 Fuentes

Los registros sísmicos fueron obtenidos ya corregidos y en formato digital de las siguientes fuentes:

- Consortium of Organizations for Strong-Motion Observation Systems (COSMOS, 2017),
- Red de Cobertura Nacional de Acelerógrafos (RENADIC,2017),
- Registros proporcionados por el profesor Gonzalo Montalva de la Universidad de Concepción.

Para la selección de los registros sísmicos se utilizó el catálogo de Bastías y Montalva (2016) donde se documentan 3572 registros de 477 terremotos (todos ellos reportados por el Centro Sismológico Nacional, CSN) ocurridos entre 1985 y 2016; y obtenidos por 181 estaciones ubicadas en distintas zonas del territorio chileno. La base de datos incluye los parámetros referentes al terremoto: magnitud, coordenadas del epicentro, profundidad focal, tipo de fuente (i.e. intraplaca, interplaca o cortical), mediciones fuente a sitio, etc. Dicha base de datos también contiene la información y características geológicas del sitio donde se ubican las estaciones (e.g.  $V_{s30}$  y  $T_0$ ) y se especifican el tipo de  $V_{s30}$  (i.e. medido o inferido) y el tipo de curvatura (i.e. plana o punto máximo) del cociente espectral H/V del Método de Nakamura (1989).

La información y los registros de los eventos de 2017 fueron obtenidos por el profesor Montalva en el marco del proyecto FONDEF D10E1027 "+ ANDES 2.0".

#### 2.2 Características de los registros sísmicos

Se consideran eventos sísmicos de tipo intra e inter-placa omitiendo los de tipo cortical debido a la limitada información (en cuanto a ingeniería estructural) que existe acerca de éstos. Se seleccionaron registros sísmicos chilenos donde al menos una de sus componentes horizontales presente una aceleración máxima de suelo (en adelante PGA, del inglés *Peak Ground Acceleration*) igual o mayor al 10% de la gravedad (i.e. registros de interés ingenieril).

#### 2.3 Contenido

La base de datos recopilada para este trabajo contiene registros obtenidos entre 1985 y julio de 2017 por estaciones ubicadas en distintas zonas del territorio chileno. La base de datos recopilada está formada por 209 registros (418 componentes NS y EO) obtenidos por 117 estaciones (ver lista de estaciones en la Tabla 2-1) y debidos a 57 eventos sísmicos (ver lista de los eventos sísmicos en la Tabla 2-2). El número de registros obtenidos por estación se muestra en la Figura 2-1 y oscila entre 6 (estación V02A) y 1 (70 estaciones).



Figura 2-1. Número de registros en cada estación.

La ubicación de las estaciones se muestra en la Figura 2-2, en donde se puede observar que las estaciones se concentran en las zonas urbanas de la zona centro y norte del territorio chileno. En la Figura 2-3 se muestra la ubicación de los epicentros de los eventos sísmicos.

En la Figura 2-4 se muestra el número de registros obtenidos por año, en donde se puede observar que una gran cantidad de los registros fueron obtenidos después del año 2010 (91 de 209), debido en gran medida a que como consecuencia del Terremoto del Maule de 2010 el número de estaciones aumentó considerablemente desde entonces. Además, también aumentó el número de eventos de los cuales se tiene registro; en la Figura 2-5 se observa que el año con mayor cantidad de eventos registrados fue 2014 y que 28 de 57 de los eventos que conforman la base de datos ocurrieron después de 2010.

La Figura 2-6 muestra la cantidad de eventos de cada magnitud, se observa que todos los eventos tienen una magnitud superior a 5.0. La mayoría de los eventos sísmicos (44 eventos) son de magnitudes menores a 7.0 y un número no despreciable (13 eventos) son mayores o iguales a 7.0. El histograma de las magnitudes se muestra en la Figura 2-7 donde se observa que todos los registros pertenecen a eventos sísmicos con magnitud igual o mayor a 5.0.

La información y características referentes a los 209 registros que comprenden esta base de datos se encuentra en el Anexo A.



Figura 2-2. Ubicación de las estaciones sísmicas.



Figura 2-3. Ubicación de los epicentros de los eventos sísmicos.


Figura 2-4. Número de registros en cada año.



Figura 2-5. Número de eventos en cada año.







Figura 2-7. Magnitud y fecha de los eventos sísmicos considerados en la base de datos.

Cália	Ubi	Ubicación		Tipo de	Τ []	Tipo de Curva	
Codigo	Latitud	Longitud	[m/s]	$V_{s30}(*)$	1 <sub>0</sub> [seg]	H/V (**)	
ANGO01R	-37.80	-72.71	355	1	0.228	punto máximo	
ANTO03R	-22.09	-70.20	492	3	0.164	164 plana	
ANTO04R	-22.09	-70.21	644	3	8.333	plana	
ANTO05R	-22.76	-70.28	452	3	8.333	punto máximo	
ANTO06R	-23.10	-70.45	343	3	7.143	punto máximo	
ANTO07R	-23.08	-70.38	546	3	3.125	punto máximo	
ANTO08R	-23.08	-70.41	108	3	4.762	punto máximo	
ANTO09R	-23.68	-70.41	574	3	5.556	plana	
ANTU	-33.57	-70.63	621	1	0.565	plana	
AP01	-18.37	-70.34	443	3	2.381	punto máximo	
ARIC02R	-18.48	-70.31	387	2	0.241	plana	
ARIC03R	-18.48	-70.31	437	2	1.064	punto máximo	
ARIC04R	-18.47	-70.31	390	1	0.800	punto máximo	
ARIC05R	-18.49	-70.31	1132	1	9.091	plana	
ARIC06R	-18.45	-70.07	533	1	1.923	punto máximo	
ARIC07R	-18.45	-70.07	511	1	2.110	punto máximo	
ARIC08R	-18.19	-69.56	329	3	0.565	punto máximo	
ARIC09R	-19.16	-70.18	502	3	0.226	punto máximo	

Tabla 2-1. Lista de estaciones consideradas en la base de datos. Información obtenida de Bastías y Montalva (2016).

Cádica	Ubi	cación	V <sub>s30</sub>	Tipo de	T	Tipo de Curva
Coalgo	Latitud	Longitud	[m/s]	$V_{s30}(*)$	I <sub>0</sub> [seg]	H/V (**)
C01O	-29.88	-71.24	399	3	0.847	punto máximo
C09O	-29.51	-71.20	576	3	0.173	punto máximo
C110	-30.70	-70.96	402	3	0.311	punto máximo
CCSP	-36.85	-73.09	236	1	0.521	punto máximo
CLCH	-33.40	-70.54	619	1	1.020	plana
CO02	-31.20	-71.00	555	3	0.223	punto máximo
CO03	-30.84	-70.69	639	3	0.128	punto máximo
CONC01R	-36.83	-73.05	223	1	1.493	punto máximo
COPI02R	-28.58	-70.76	535	3	0.211	punto máximo
CSCH	-33.32	-71.41	322	1	0.758	punto máximo
EN01CV	-34.76	-71.13	721	3	0.049	punto máximo
EN02RA	-34.04	-71.59	588	3	3.125	plana
EN03TO	-33.10	-70.75	431	3	0.323	punto máximo
EN04ME	-35.76	-71.09	1114	3	5.556	plana
GO01	-19.67	-69.19	973	1	0.129	punto máximo
GO03	-27.59	-70.23	695	3	0.189	plana
GO04	-30.17	-70.80	405	3	0.610	punto máximo
GO05	-35.01	-71.93	536	3	0.332	punto máximo
HMBCX	-20.28	-69.89	677	1	0.781	punto máximo
LACH	-33.45	-70.53	574	1	1.887	plana

Cádias	Ubi	cación	V <sub>s30</sub>	V <sub>s30</sub> Tipo de		Tipo de Curva
Coalgo	Latitud	Longitud	[m/s]	V <sub>s30</sub> (*)	I <sub>0</sub> [seg]	H/V (**)
LAGO01R	-39.83	-73.24	274	1	1.370	punto máximo
LSCH	-29.91	-71.25	552	1	0.345	punto máximo
MATA01R	-33.96	-71.87	394	1	0.483	punto máximo
MAUL01R	-34.99	-71.24	623	1	0.220	punto máximo
MAUL02R	-34.98	-71.81	547	1	0.457	punto máximo
MAUL02S	-35.97	-72.32	388	1	0.472	punto máximo
MAUL03R	-35.43	-71.66	537	1	0.355	punto máximo
MAUL04R	-35.34	-72.41	224	1	0.346	punto máximo
MAUL04S	-35.33	-72.41	195	1	1.087	punto máximo
MAUL05S	-35.01	-71.93	533	3	0.336	punto máximo
MAUL06S	-34.96	-72.18	632	3	0.294	punto máximo
MELP	-33.69	-71.21	599	1	0.267	punto máximo
MNMCX	-19.13	-69.60	693	3	0.176	punto máximo
OLMU	-32.99	-71.17	392	1	0.685	punto máximo
PB01	-21.04	-69.49	603	3	0.294	punto máximo
PB02	-21.32	-69.90	746	3	0.775	plana
PB11	-19.76	-69.66	846	3	1.887	punto máximo
PB12	-18.61	-70.33	599	3	0.207	punto máximo
PSGCX	-19.60	-70.12	569	3	0.549	plana
R07M	-33.37	-70.69	356	3	1.282	punto máximo

Cádica	Ubi	cación	V <sub>s30</sub>	Tipo de	T	Tipo de Curva
Codigo	Latitud	Longitud	[m/s]	$V_{s30}(*)$	I <sub>0</sub> [seg]	H/V (**)
R12M	-33.39	-70.62	311	1	1.010	punto máximo
R13M	-33.22	-70.77	401	3	0.763	punto máximo
R18M	-33.51	-70.75	379	3	0.370	punto máximo
RANC01S	-33.94	-71.74	108	3	7.692	plana
RANC02S	-34.59	-70.98	666	1	9.091	plana
RANC03S	-34.39	-72.00	613	3	0.128	punto máximo
ROC1	-32.98	-71.02	1951	1	0.101	punto máximo
SERE01R	-29.91	-71.25	552	1	0.270	punto máximo
SERE02R	-31.64	-71.17	502	3	0.228	punto máximo
SERE03R	-31.20	-71.61	854	3	0.207	punto máximo
SJCH	-33.64	-70.35	556	1	0.709	punto máximo
STGO01R	-33.47	-70.65	343	3	0.413	punto máximo
STGO01S	-33.69	-71.21	481	1	9.091	plana
STGO02R	-33.51	-70.77	386	1	0.478	punto máximo
STGO03R	-33.50	-70.58	379	1	0.495	punto máximo
STGO03S	-33.44	-70.65	412	3	0.694	punto máximo
STGO04R	-33.51	-70.61	598	1	2.857	plana
STGO05R	-33.58	-70.58	496	1	0.526	plana
STL	-33.44	-70.64	1411	1	0.052	punto máximo
T01A	-20.27	-70.12	725	3	0.735	punto máximo

Cádigo	Ubi	cación	V <sub>s30</sub>	Tipo de	T [cog]	Tipo de Curva
Codigo	Latitud	Longitud	[m/s]	$V_{s30}(*)$	I <sub>0</sub> [seg]	H/V (**)
T02A	-20.25	-70.12	278	1	0.699	punto máximo
T03A	-20.23	-70.15	635	3	0.143	punto máximo
T04A	-20.24	-70.13	697	3	0.040	punto máximo
T05A	-20.21	-70.15	809	1	0.214	punto máximo
T06A	-20.21	-70.14	276	3	0.599	punto máximo
T07A	-20.26	-69.79	344	1	0.405	punto máximo
T08A	-20.27	-70.09	680	1	0.070	punto máximo
T09A	-19.60	-70.21	826	3	0.040	punto máximo
T10A	-20.00	-69.77	418	1	0.357	punto máximo
T13A	-20.50	-69.34	357	1	0.481	punto máximo
TA01	-20.57	-70.18	566	3	0.190	punto máximo
TA02	-20.27	-70.13	715	3	0.168	punto máximo
TARA01R	-19.60	-70.21	529	3	0.262	punto máximo
TARA02R	-19.60	-70.21	750	3	0.040	punto máximo
TARA04R	-20.27	-70.10	589	3	0.140	punto máximo
TARA05R	-20.49	-69.33	492	3	0.227	punto máximo
TARA06R	-20.21	-70.14	449	3	0.260	punto máximo
TARA07R	-20.25	-70.13	394	3	0.376	punto máximo
TARA08R	-20.21	-70.15	477	3	0.262	punto máximo
TARA09R	-20.22	-70.14	386	3	0.641	punto máximo

Cádico	Ubi	cación	V <sub>s30</sub> Tipo de		T [cog]	Tipo de Curva
Coalgo	Latitud	Longitud	[m/s]	$V_{s30}(*)$	I <sub>0</sub> [seg]	H/V (**)
TARA11R	-21.42	-70.06	642	3	0.085	punto máximo
TARA12R	-20.00	-69.77	373	3	0.347	punto máximo
V02A	-33.02	-71.52	622	3	0.137	punto máximo
VA03	-32.76	-70.55	688	3	0.127	punto máximo
VALP01R	-32.51	-71.45	933	1	0.290	punto máximo
VALP01S	-32.45	-71.23	428	1	-	-
VALP02R	-33.02	-71.55	314	3	0.541	punto máximo
VALP02S	-32.55	-71.46	641	3	0.130	punto máximo
VALP03R	-33.05	-71.51	260	1	0.893	punto máximo
VALP04R	-33.05	-71.51	477	3	0.244	punto máximo
VALP04S	-32.84	-70.94	270	1	1.282	punto máximo
VALP05S	-33.19	-71.70	570	3	0.633	plana
VALP06R	-33.04	-71.59	239	1	0.690	punto máximo
VALP07R	-33.03	-71.60	684	3	9.091	plana
VALP07S	-33.03	-71.58	242	1	0.535	punto máximo
VALP08R	-33.62	-71.62	316	1	0.435	punto máximo
VALP10S	-33.04	-71.57	587	3	2.439	punto máximo
VALP11S	-33.02	-71.56	382	3	0.365	punto máximo
VALP13S	-32.75	-71.48	219	2	1.020	punto máximo

(\*) El tipo 1 corresponde al valor de  $V_{s30}$  medido. Los tipos 2 y 3 se refieren al valor estimado según los métodos descritos en Bastías y Montalva (2016).

(\*\*) Periodo predominante de vibración del terreno T<sub>0</sub> estimado a partir de la medición de vibraciones ambientales y la evaluación de la razón espectral H/V (método de Nakamura, 1989). Generalmente para suelos rígidos la razón espectral H/V resulta plana (no muestra un valor predominante). Punto máximo indica que en la curva de razón espectral H/V se observa una frecuencia o periodo predominante.

Cália		Fecha		Ubic	ación	Profundidad	Magnitud
Codigo	Año	Mes	Día	Latitud	Longitud	[km]	$\mathbf{\widetilde{M}}_{\mathbf{w}}$
50001	1985	3	3	-33.24	-71.85	33.00	7.9
50002	1985	4	9	-34.13	-71.62	37.00	7.1
50004	1996	2	22	-33.63	-71.63	46.00	5.9
50005	1997	10	15	-30.77	-71.32	56.00	7.1
50008	1997	11	3	-30.66	-71.79	44.00	6.2
50009	1997	4	1	-18.32	-69.54	117.70	6.1
50014	1999	8	1	-33.08	-70.10	107.90	5.5
50020	2001	6	23	-17.28	-72.71	29.60	8.4
50023	2001	7	24	-32.88	-71.78	54.80	5.2
50030	2002	6	18	-30.83	-71.34	52.20	6.4
50041	2005	3	25	-20.44	-69.21	95.00	5.1
50046	2005	10	17	-17.77	-69.49	123.00	5.7
50047	2005	6	13	-20.05	-69.33	114.90	7.8
50048	2006	2	10	-32.60	-71.56	33.80	5.2
50050	2006	4	9	-20.79	-70.77	35.00	5.7
50053	2006	6	20	-32.92	-71.64	42.00	5.0
50054	2006	10	12	-31.34	-71.70	36.90	6.4
50062	2007	11	14	-22.31	-70.08	47.70	7.7

Tabla 2-2. Lista de eventos sísmicos considerados en la base de datos. Informaciónobtenida de Bastías y Montalva (2016).

Cádico		Fecha		Ubicación		Profundidad	Magnitud
Courgo	Año	Mes	Día	Latitud	Longitud	[km]	M <sub>w</sub>
50064	2007	11	15	-23.00	-70.49	29.70	6.8
50068	2007	12	15	-32.71	-71.75	37.40	5.9
50069	2007	12	16	-22.96	-70.20	45.20	6.7
50070	2008	1	22	-19.95	-70.10	49.40	5.2
50071	2008	2	4	-20.27	-70.27	45.90	6.3
50072	2008	3	1	-20.41	-70.19	43.80	5.6
50073	2008	3	24	-20.20	-69.34	122.50	6.2
50084	2009	11	13	-19.51	-70.50	39.00	6.5
50085	2009	12	22	-28.61	-71.03	45.00	5.2
50087	2010	2	27	-36.29	-73.24	30.10	8.8
50089	2010	2	28	-35.01	-71.92	19.40	6.2
50091	2014	4	1	-19.57	-70.91	38.90	8.1
50092	2014	4	3	-20.52	-70.44	27.70	7.7
50116	2014	4	28	-19.56	-70.38	43.60	5.1
50122	2014	4	2	-20.08	-70.96	25.20	5.2
50124	2014	4	3	-20.31	-70.58	30.70	6.6
50179	2014	5	30	-21.31	-69.97	67.80	5.1
50180	2014	5	30	-21.30	-69.99	59.60	5.6
50182	2014	6	5	-20.34	-70.22	40.50	5.1
50188	2014	7	13	-20.24	-70.31	40.70	5.6

Cádico		Fecha		Ubicación		Profundidad	Magnitud
Courgo	Año	Mes	Día	Latitud	Longitud	[km]	M <sub>w</sub>
50193	2014	8	23	-32.74	-71.50	40.10	6.4
50234	2011	2	11	-36.68	-73.59	20.90	6.8
50301	2012	3	25	-35.20	-72.22	40.70	7.1
50341	2012	11	14	-29.24	-71.23	82.30	6.2
50354	2013	1	30	-28.18	-70.88	52.20	6.8
50459	2014	8	14	-20.16	-70.02	50.90	5.3
50460	2014	8	23	-20.19	-69.08	100.30	5.6
50497	2014	4	3	-20.31	-70.58	30.70	6.6
50498	2014	4	3	-20.52	-70.44	27.70	7.7
50525	2015	2	17	-32.38	-70.99	77.50	5.4
50670	2015	9	16	-31.55	-71.86	23.30	8.2
50671	2015	9	16	-31.90	-71.90	29.20	6.8
50672	2015	9	16	-31.59	-71.79	16.50	7.6
50682	2015	9	22	-31.45	-71.13	63.30	6.0
50684	02015	9	26	-30.79	-71.42	40.30	6.3
50694	2017	4	24	-33.09	-72.09	25.00	6.9
50698	2017	4	28	-33.26	-72.11	23.00	5.5
50700	2017	4	28	-33.17	-71.66	26.00	5.8
50701	2017	4	28	-33.30	-71.98	22.00	5.0

## **3 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ESPECTRALES**

En este capítulo se describe la metodología utilizada para la construcción de los espectros de respuesta de desplazamiento y pseudo-aceleración. Posteriormente, se describe la metodología utilizada para determinar los parámetros espectrales que definen el espectro de diseño de Newmark-Hall (i.e.  $T_b$ ,  $T_c$  y  $\alpha_A$ ).

Los espectros de respuesta se construyen de dos formas: considerando cada componente horizontal en forma independiente, y combinando los espectros de cada componente horizontal utilizando la metodología propuesta por Boore et al. (2006).

La ejecución de los procedimientos descritos en este capítulo fue realizada con el software de programación MATLAB y los códigos de los programas desarrollados para este fin se encuentran en los Anexos de este documento.

#### 3.1 Construcción de los espectros de respuesta

Los espectros de respuesta utilizados en este trabajo fueron calculados de la manera usual, es decir, considerando un sistema elástico y lineal de un grado de libertad.

Se utilizó la metodología descrita en Chopra (2012). Los pasos ejecutados para la construcción de los espectros son los siguientes:

- 1) Definir numéricamente la aceleración del terreno  $\ddot{u}_{gt}$  (registro de aceleraciones sísmicas del terreno).
- 2) Seleccionar el periodo de vibración natural  $T_n$  y la fracción de amortiguamiento  $\xi$  de un sistema de un grado de libertad.
- 3) Calcular la respuesta de desplazamiento u(t) del sistema de 1 GDL seleccionado en el paso anterior, debida al movimiento del terreno  $\ddot{u}_{gt}$  definido en el primer paso.
- Determinar la ordenada espectral *D* (desplazamiento) que corresponde al máximo valor (en valor absoluto) de la respuesta de desplazamiento *u*(*t*).
- 5) Determinar la ordenada espectral A (pseudo-aceleración) donde  $A = (2\pi/T_n)^2 D$ .
- 6) Repetir los pasos 2 a 5 considerando rangos de valores de  $T_n$  y  $\xi$  que cubran todos los sistemas de interés.

Se consideró un rango de periodos de vibración natural  $(T_n)$  de 0.01 s a 4.00 s con un intervalo  $\Delta T_n = 0.01$  s (400 periodos o frecuencias de vibración). Se considera una fracción de amortiguamiento de  $\xi = 5\%$ , valor comúnmente adoptado para estructuras en general, y estructuras de hormigón armado en particular.

El cálculo de la respuesta de desplazamiento (paso 3) se realizó mediante integración numérica utilizando la solución exacta (Chopra, 2012) de la ecuación del movimiento (ecuación 3-1), solución que considera que la variación de la aceleración del suelo es lineal por intervalos de tiempo  $\Delta t$  (en la mayoría de los registros  $\Delta t = 0.005$  s).

$$\ddot{u} + 2\xi\omega_n\dot{u} + \omega_n^2 u = -\ddot{u}_g(t) \tag{3-1}$$

Para garantizar la precisión de la integración numérica se estableció el límite  $\Delta t/T_n < 0.05$ . En los casos en que este límite es sobrepasado (periodos de vibración cortos) se redujo el paso de tiempo  $\Delta t$  mediante interpolación lineal. En Chopra (2012) se propone un valor límite de  $\Delta t/T_n < 0.10$  por lo que el valor establecido en este trabajo asegura una buena precisión.



Figura 3-1. Espectros de respuesta de desplazamiento de las componentes horizontales de registro 20148 captado por la estación LACH durante el terremoto del Maule en 2010.

Como ejemplo se muestran en la Figura 3-1 los espectros de respuesta de desplazamiento y en la Figura 3-2 los espectros de respuesta de pseudo-aceleración de las dos componentes horizontales del registro 20148 (ver lista de registros en el Anexo A) captado por la estación LACH durante el terremoto del Maule del 27 de Febrero de 2010. El programa desarrollado para este ejemplo se muestra en el Anexo B.



Figura 3-2. Espectros de respuesta de pseudo-aceleración de las componentes horizontales de registro 20148 captado por la estación LACH durante el terremoto del Maule en 2010.

### 3.2 Consideración de la direccionalidad

Las maneras comunes de combinar la respuesta espectral de las componentes horizontales de un registro (e.g., media aritmética, media geométrica o media cuadrática) presentan un problema debido a que no consideran que el valor de las ordenadas espectrales no es independiente de la orientación de los sensores que captan cada componente de un registro. Reconociendo tal dependencia, se adopta la metodología propuesta por Boore et al. (2006) para combinar las respuestas de las componentes horizontales. La metodología consiste en proyectar las componentes horizontales (NS y EO) del registro en diferentes direcciones caracterizadas por el ángulo  $\theta$  entre la dirección a considerar y la dirección EO. La componente de un registro sísmico en la dirección definida por  $\theta$  queda dada por la ecuación (3-2)

$$acc(t,\theta) = acc_{E0}(t)\cos\theta + acc_{NS}(t)\sin\theta$$
 (3-2)

donde  $acc(t, \theta)$  es el registro de aceleraciones en la dirección definida por el ángulo  $\theta$ ,  $acc_{EO}(t)$  es la componente EO del registro,  $acc_{NS}(t)$  es la componente NS del registro y t indica el tiempo.

En la Figura 3-3 se puede observar la periodicidad que existe en los valores de pseudoaceleración obtenidos para un periodo fijo ( $T_n$ = 2.0 s en este caso) al considerar la metodología RotDpp. Naturalmente, debido a esta periodicidad, solo es necesario considerar valores de  $\theta$  entre 0° y 180°.



Figura 3-3. Direccionalidad de la ordenada espectral de pseudo-aceleración para un periodo natural igual a 0.2 s (registro 20148 captado por la estación LACH durante el terremoto del Maule en 2010).

Después de obtener los registros de aceleraciones para cada uno de los ángulos de rotación, se construyen los espectros de respuesta correspondientes a cada dirección. Finalmente, como combinación de la respuesta de las componentes horizontales, se consideran las

ordenadas espectrales percentil 50 (i.e., las medianas) de las ordenadas espectrales obtenidas para cada valor de  $\theta$  en cada periodo de vibración natural.

Utilizando el mismo registro de la estación LACH ya mencionado, la metodología propuesta por Boore et al. (2006) se ilustra en la Figura 3-4 donde se puede observar el espectro de respuesta de pseudo-aceleración que se obtiene considerando los valores percentil 50 del conjunto de 180 espectros obtenidos de las 180 componentes. En esta misma figura se observan los espectros de respuesta de las componentes NS y EO de manera independiente.





#### 3.3 Ajuste del espectro de diseño tipo Newmark-Hall

Para determinar los parámetros que definen la forma espectral de Newmark-Hall se realiza el mejor ajuste posible del espectro de diseño de Newmark-Hall a espectros de respuesta de desplazamiento y de pseudo-aceleración. La calidad de este ajuste se califica considerando el coeficiente de determinación, el cual está dado por:

$$R^{2} = 1 - \frac{\sum \left( \left[ y_{i} - f_{NH_{i}} \right]^{2} \right)}{\sum \left( \left[ y_{i} - \bar{y} \right]^{2} \right)}$$
(3-3)

Donde  $y_i$  es el valor de la ordenada espectral en el periodo i,  $f_{NH_i}$  es el valor de la ordenada espectral predicho para el espectro de Newmark-Hall en el periodo i, e  $\bar{y}$  es el promedio de los valores de las ordenadas espectrales correspondientes a todos los periodos del espectro de respuesta a ajustar. El coeficiente de determinación  $R^2$  es un indicador de la calidad del ajuste, a medida que el valor del coeficiente de determinación sea más cercano a la unidad, mejor será la calidad del ajuste. El espectro que mejor ajusta es determinado mediante un algoritmo de optimización desarrollado en MATLAB.

Como primer paso, se determina el periodo  $T_d$  ajustando del espectro de Newmark-Hall a un espectro de respuesta de desplazamiento (en escala aritmética) debido a que de esta forma es más fácil visualizar el cambio entre la región sensible a la velocidad ( $T_c \leq T_n \leq$  $T_d$ ) y la región sensible al desplazamiento ( $T_n \geq T_d$ ). Para realizar este ajuste, la forma espectral de Newmark-Hall es simplificada a una recta de pendiente positiva con origen en ( $T_n = 0.0 \text{ s}, D = 0.0 \text{ cm}$ ) más una recta horizontal en  $T_n \geq T_d$ . La forma espectral real de Newmark-Hall en un espectro de desplazamiento en escala aritmética sólo difiere levemente de la forma simple adoptada en un rango pequeño de periodos cortos, en consecuencia la forma simple no afecta la precisión de la estimación de  $T_d$ .

Una vez determinado el periodo  $T_d$  se utiliza el valor de éste como dato de entrada para el algoritmo que realiza el ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall al espectro de respuesta de pseudo-aceleración (en escala aritmética).

Como ejemplo de la metodología descrita en esta sección se muestra en la Figura 3-5 el ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall simplificado al espectro de respuesta de desplazamiento de la componente NS del registro 20148 captado por la estación LACH durante el terremoto del Maule en 2010. Como resultado se tiene un valor de periodo  $T_d = 1.84$  s, el cual es utilizado posteriormente como dato de entrada para realizar el ajuste del espectro de diseño al espectro de respuesta de pseudo-aceleración de este mismo registro (Figura 3-6). Como resultado del ajuste se obtiene PGA = 0.21 g,  $T_b = 0.25$  s,  $T_c = 0.56$  s y  $\alpha_A = 4.12$ . El algoritmo desarrollado en MATLAB para este ejemplo se muestra en el Anexo C.



Figura 3-5. Ajuste del espectro de diseño tipo Newmark-Hall a un espectro de respuesta de desplazamiento (componente NS del registro 20148 captado por la estación LACH durante el terremoto del Maule en 2010).



Figura 3-6. Ajuste del espectro de diseño tipo Newmark-Hall a un espectro de respuesta de pseudo-aceleración (componente NS del registro 20148 captado por la estación LACH durante el terremoto del Maule en 2010).

## 4 ANÁLISIS DE GRUPOS DE REGISTROS SÍSMICOS

En este capítulo se describe la metodología utilizada para el agrupamiento y análisis de los registros sísmicos de la base de datos descrita en la Sección 2. Los registros son agrupados y analizados de acuerdo a distintas metodologías de clasificación de suelos, las cuales se describen en la Sección 4.1. Se utiliza la Clasificación Actual y la Clasificación SOCHIGE. Además, se analizan otras formas de clasificación considerando distintos parámetros de caracterización tales como  $V_{s30}$  y  $T_0$ .

Una vez agrupados los registros se construyen y normalizan los espectros de respuesta de desplazamiento y pseudo-aceleración. La metodología considerada para la normalización de los registros es descrita en la Sección 4.2.

De los grupos de espectros de respuesta normalizados se obtiene un espectro representativo de cada grupo (espectro percentil 50) al cual se le realiza el ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall con el fin de determinar los valores de los correspondientes parámetros espectrales (i.e. periodos y factores de amplificación). Esta metodología es descrita en la Sección 4.3.

#### 4.1 Metodologías de clasificación de suelos (casos de estudio)

La base de datos recopilada (Sección 2), formada por 209 registros, fue utilizada para el estudio de distintas formas de clasificar el suelo según distintos parámetros de caracterización. A las distintas formas de clasificar el suelo analizadas en este trabajo se les llama en adelante casos de estudio.

Los casos de estudio considerados en este trabajo son cuatro y consisten en el análisis de los espectros de los registros agrupados según:

- 1) la clasificación de suelos de la norma chilena actual de diseño sísmico de edificios,
- 2) la clasificación de suelos propuesta en 2017 por la Sociedad Chilena de Geotecnia,
- 3) el valor de  $V_{s30}$
- 4) el valor del  $T_0$

Los casos de estudio prioritarios son los casos 1) (Clasificación Actual) y 2) (Clasificación SOCHIGE). Además, con el fin de enriquecer el estado del arte se presentan análisis

estadísticos de espectros considerando como parámetros de agrupamiento únicamente valores de  $V_{s30}$  (caso 3) y  $T_0$  (caso 4) por separado.

Los cuatro casos de estudio se analizan para dos zonas de interés: todo el territorio chileno por un lado, y la zona del territorio continental de Chile comprendida entre San Antonio y Los Vilos (cuantitativamente definida como la zona limitada por los paralelos 33.7770° y -31.9167°). A esta zona se le llama en adelante "zona central de Chile".

En cada uno de los cuatro casos de estudio se consideran distintas condiciones en cuanto a la información geología de las estaciones sísmicas. Se consideran estaciones de la base de datos donde la información del sitio presente cierto tipo de valor de  $V_{s30}$  y cierto tipo de curvatura H/V. La Tabla 4-1 muestra las condiciones que se consideran en cada caso de estudio. El tipo de  $V_{s30}$  se refiere a la forma en que fue obtenido este valor; medido cuando es tomado directamente del terreno e inferido cuando es obtenido mediante alguno de los métodos descritos por Bastías y Montalva (2016). El tipo de curva H/V se refiere a la evaluación de la razón espectral H/V (método de Nakamura, 1989), donde puede presentarse una curva plana o una curva que muestre un valor máximo de H/V que defina claramente un periodo predominante  $T_0$ .

La Figura 4-1 muestra el ejemplo de una curva H/V plana, se observa que la curva no presenta un valor máximo que defina un periodo predominante  $T_0$ . Contrario a lo anterior, en la Figura 4-2 se observa una curva H/V con un valor de  $T_0$  claramente definido por un punto máximo en la curva.

En la Tabla 4-1 también se muestra el número de registros utilizados en cada caso para el análisis de cada una de las zonas de interés. Se observa que para los casos 1 y 3 el tipo de curva H/V no es relevante debido a que en estos casos solo se considera el valor de  $V_{s30}$  (medido) como parámetro de caracterización del suelo. Se observa que para el caso 2 se utiliza un registro menos que para los casos 1 y 3 debido a que una de las estaciones del catálogo no presenta información respecto al valor de  $T_0$  y tipo de curva H/V. El registro obtenido en esta estación fue descartado debido a que la Clasificación SOCHIGE demanda que el valor de  $T_0$  y el tipo de curva H/V sean datos conocidos. Para el caso 4 el valor y tipo de  $V_{s30}$  no es relevante debido a que se estudia únicamente el valor de  $T_0$  (curva H/V con punto máximo) como parámetro de caracterización del suelo.



Figura 4-1. Ejemplo de curva H/V sin un valor de periodo predominante bien definido (curva tipo plana).



Figura 4-2. Ejemplo de curva H/V con un valor de periodo predominante bien definido (curva tipo punto máximo).

Casa	Tino do V co	Tipo de curva	Número de registros utilizados		
Casu	11po de V <sub>\$30</sub>	H/V	Todo Chile	Zona central	
1	Medido	Máximo o plana	74	31	
2	Medido	Máximo o plana	73	30	
3	Medido	Máximo o plana	74	31	
4	Medido o inferido	Máximo	178	48	

Tabla 4-1. Condiciones que deben cumplir las estaciones en cada caso de estudio y número de registros utilizados.

#### 4.1.1 Grupos de registros según la Clasificación Actual de suelos

Para el caso 1 los registros sísmicos se agrupan de acuerdo a la clasificación actual de suelos para el diseño sísmico de edificios habitacionales y de oficinas presentada en el DS61/2011 (ver Tabla 1-1). El número de estaciones y de registros correspondientes a cada uno de los tipos de suelo, definidos considerando únicamente los valores límite de  $V_{s30}$  indicados en la Clasificación Actual, se muestran en la Tabla 4-2 para el análisis de todo el territorio chileno y en la Tabla 4-3 para el análisis de la zona central de Chile. Se observa que el número de registros es significativo para Suelos Tipo A, B, C y D, pero es nulo para el suelo más blando (Suelo Tipo E). Se observa que el tipo suelo para el cual se cuenta con más registros y más estaciones es el Suelo Tipo B para el análisis de todo Chile y el Suelo Tipo D para la zona central de Chile.

Tabla 4-2. Número de estaciones y de registros por cada tipo de suelo según laClasificación Actual (registros obtenidos en todo Chile).

Suelo Tipo (DS 61/2011)	$\mathbf{N}^{\circ}$ de estaciones	N° de registros
А	5	9
В	18	26
С	12	16
D	13	23
E	0	0

Tabla 4-3. Número de estaciones y de registros por cada tipo de suelo según la Clasificación Actual (registros obtenidos en la zona central de Chile).

Suelo Tipo (DS 61/2011)	$\mathbf{N}^{\circ}$ de estaciones	N° de registros
А	3	5
В	6	7
С	6	6
D	7	13
Е	0	0

#### 4.1.2 Grupos de registros según la Clasificación SOCHIGE

Para el caso 2 los registros sísmicos se agrupan de acuerdo a lo propuesto recientemente por la Sociedad Chilena de Geotecnia (ver Tabla 1-2). El número de estaciones y de registros correspondientes a cada uno de los tipos de suelo definidos considerando valores límite de  $V_{s30}$  y  $T_0$  (y tipo de curva H/V) se muestran en la Tabla 4-4 para el análisis de todo el territorio chileno y en la Tabla 4-5 para el análisis de la zona central de Chile.

Tabla 4-4. Número de estaciones y de registros por cada tipo de suelo según laClasificación SOCHIGE (registros obtenidos en todo Chile).

Suelo Tipo (Propuesta SOCHIGE)	N° de estaciones	N° de registros
А	4	6
В	11	19
С	11	15
D	16	28
E	5	5

Suelo Tipo (Propuesta SOCHIGE)	N° de estaciones	N° de registros
А	2	2
В	6	9
С	3	3
D	8	14
E	2	2

Tabla 4-5. Número de estaciones y de registros por cada tipo de suelo según la Clasificación SOCHIGE (registros obtenidos en la zona central de Chile).

En comparación con el caso 1 se puede observar que el número de registros se reduce para suelos firmes y/o densos (tipos A, B y C) y aumenta para suelos medianamente densos (tipos D y E), debido naturalmente a la degradación en un nivel del tipo de suelo que considera la propuesta al incorporar el valor del periodo predominante y el tipo de curva H/V como parámetros de clasificación. Se observa que en este caso el mayor número de registros se encuentran clasificados dentro del Suelo Tipo D para ambas zonas de interés.

# 4.1.3 Grupos de registros clasificando el suelo considerando únicamente el valor de $V_{s30}$

Para el caso 3 se construyen grupos de registros considerando como parámetro de caracterización únicamente el valor de  $V_{s30}$ . La metodología utilizada consiste en crear grupos de registros de manera tal que la diferencia entre los valores máximos y mínimos de  $V_{s30}$  no sea mayor a 100 m/s. Este valor fue tomado arbitrariamente debido a que se considera que es un diferencial lo suficientemente pequeño como para crear grupos representativos de la mediana de los valores de  $V_{s30}$ .

A continuación, se describen los pasos realizados para la construcción de los grupos según la velocidad de onda de corte. A modo de ejemplificar la metodología, se utilizan los 31 registros correspondientes a la zona central de Chile:

i. Los registros se ordenan por valor de  $V_{s30}$  en forma descendente, es decir de los suelos firmes y/o densos a los suelos medianamente densos (ver Tabla 4-6).

- ii. Se construyen los grupos considerando una diferencia no mayor a 100 m/s entre el valor máximo y mínimo de  $V_{s30}$ . Por ejemplo, para el primer grupo se tiene que el valor máximo es de 1951 m/s, por lo cual se consideran registros donde el suelo tiene un valor de  $V_{s30}$  entre 1851 y 1951 m/s. Como se puede observar en la Tabla 4-6 estos valores límite de  $V_{s30}$  definen un grupo formado por solo un registro. La Tabla 4-8 muestra el número de registros y de estaciones por cada grupo (considerando la zona central de Chile).
- iii. Se inicia un nuevo grupo descartando el (o los) registro (s) de la (o las) estación (es) que tenga(n) el máximo valor de  $V_{s30}$  del grupo anterior. Por ejemplo, para el grupo 2 se descarta el registro de la estación con valor de  $V_{s30}$  igual a 1951 m/s. En este caso el siguiente valor máximo de  $V_{s30}$  es 1411 m/s, por lo cual éste es el valor de  $V_{s30}$  con el cuál se inicia el grupo 2. El rango de valores de  $V_{s30}$  del grupo 2 es entre 1311 m/s y 1411 m/s, limites que únicamente cumple un registro.
- iv. Se repiten los pasos ii y iii hasta agrupar todos los registros de la base de datos.

El número de estaciones y de registros correspondientes a cada uno de los grupos definidos utilizando la metodología descrita anteriormente (considerando únicamente los valores de  $V_{s30}$ ) se muestran en la Tabla 4-7 para el análisis de todo el territorio chileno y en la Tabla 4-8 para el análisis de la zona central de Chile. El valor de  $V_{s30}$  de cada grupo indicado en las tablas se obtuvo calculando la mediana de los valores de  $V_{s30}$  de las estaciones que conforman cada grupo.

En la Tabla 4-7 se observa que para el análisis de los datos de todo el territorio chileno se pudieron formar 47 grupos los cuales contienen desde 1 solo registro (4 grupos) hasta 21 registros (grupo 35) y que el número de estaciones va desde 1 (6 grupos) hasta 12 (3 grupos). En la Tabla 4-8 se observa que para el análisis con los datos de la zona central de Chile se pudieron formar 22 grupos los cuales contienen desde 1 solo registro (4 grupos) hasta 13 registros (grupo 16) y que el número de estaciones va desde 1 (4 grupos) hasta 7 (grupo 16).

Reg ID	Estación	V <sub>s30</sub> [m/s]	Reg ID	Estación	V <sub>s30</sub> [m/s]
20149	ROC1	1951	20127	STGO02R	386
20146	STL	1411	20128	STGO03R	379
20024	VALP01R	933	20150	CSCH	322
20136	VALP01R	933	20017	VALP08R	316
20731	VALP01R	933	20038	VALP08R	316
20147	ANTU	621	20141	VALP08R	316
20144	CLCH	619	91001	R12M	311
20143	MELP	599	20018	VALP04S	270
20129	STGO04R	598	20065	VALP03R	260
20734	STGO04R	598	20092	VALP03R	260
20148	LACH	574	20138	VALP03R	260
20145	SJCH	556	20021	VALP07S	242
20130	STGO05R	496	20026	VALP06R	239
20007	STGO01S	481	20093	VALP06R	239
20015	VALP01S	428	20139	VALP06R	239
20151	OLMU	392			

Tabla 4-6. Lista de registros utilizados para el caso de estudio 3 ordenados por valor de  $V_{s30}$  en forma descendente (registros obtenidos en la zona central de Chile).

Tabla 4-7. Número de estaciones y de registros por grupo, clasificando en función del valor de  $V_{s30}$  (registros obtenidos en todo Chile).

Grupo	N° de Estaciones	N° de Registros	V <sub>s30</sub> [m/s]
1	1	1	1951
2	1	1	1411
3	1	1	1132
4	2	6	953
5	1	3	933
6	1	3	809
7	8	14	644.5
8	7	11	623
9	7	9	619
10	12	15	574
11	11	13	556
12	10	12	554

Grupo	N° de Estaciones	N° de Registros	V <sub>s30</sub> [m/s]
13	10	12	552
14	9	11	552
15	10	11	537
16	9	10	537
17	8	9	537
18	6	7	533
19	5	6	522
20	4	4	503.5
21	5	6	454.5
22	4	5	428
23	8	10	393
24	11	15	388
25	11	15	386
26	12	17	357
27	11	16	357
28	10	15	357
29	9	13	355
30	8	12	349.5
31	7	11	344
32	10	18	313.5
33	9	15	278
34	8	14	278
35	12	21	260
36	11	20	260
37	10	17	260
38	10	17	242
39	9	14	239
40	8	13	239
41	7	12	239
42	6	9	236
43	5	8	236
44	4	5	224
45	3	3	223
46	2	2	209
47	1	1	195

Cmuno	N° de	N° de	Va <b>20 [m</b> /a]
Grupo	Estaciones	Registros	v 850 [III/8]
1	1	1	1951
2	1	1	1411
3	1	3	933
4	6	7	598
5	5	6	598
6	4	5	598
7	3	4	586
8	4	4	526
9	3	3	496
10	3	3	481
11	4	4	410
12	4	4	389
13	6	8	319
14	5	7	316
15	4	6	316
16	7	13	260
17	6	12	260
18	5	9	260
19	4	8	251
20	3	7	242
21	2	4	239
22	1	3	239

Tabla 4-8. Número de estaciones y de registros por grupo, clasificando en función del valor de  $V_{s30}$  (registros obtenidos en la zona central de Chile).

# 4.1.4 Grupos de registros clasificando el suelo considerando únicamente el valor de T<sub>0</sub>

Para el caso 4 se agrupan los registros sísmicos considerando solamente el valor de  $T_0$ . La metodología utilizada para agrupar los registros sísmicos es análoga a la realizada en el caso 3 pero con el valor de  $T_0$  y no de  $V_{s30}$ , considerando un diferencial de periodo predominante  $T_0$  de 0.10 segundos.

A continuación, se describen los pasos realizados para la construcción de los grupos de registros, utilizando como ejemplo los grupos obtenidos para el análisis de la zona central de Chile.

- i. Los registros se ordenan por valor de  $T_0$  en forma ascendente, es decir de los suelos firmes y/o densos a los suelos medianamente densos (ver Tabla 4-9).
- ii. Los registros se agrupan considerando una diferencia de valores de  $T_0$  no mayor a 0.10 s entre el mínimo y el máximo valor de  $T_0$  de cada grupo. Por ejemplo, para el grupo 1 se tiene que el valor mínimo es 0.052 s, por lo cual para el primer grupo se consideran registros donde el valor de  $T_0$  varía entre 0.052 y 0.152 m/s. Como se puede observar en la Tabla 4-9 estos valores límite de  $T_0$  definen un grupo formado por los primeros 13 registros (Tabla 4-11).
- iii. Se define un nuevo grupo descartando el (los) registro (s) de la (s) estación (es) que tenga(n) el valor mínimo de  $T_0$  del grupo anterior. Por ejemplo, para el grupo 2 se descarta el registro de la estación con valor de  $T_0$  igual a 0.052 m/s. En este caso el siguiente valor de  $T_0$  es 0.101 s, por lo cual éste es el valor mínimo de  $T_0$  con el cuál se inicia el grupo 2. El rango de valores de  $T_0$  del grupo 2 varía entre 0.101 s y 0.201 s. Como se observa en la Tabla 4-11 dentro de estos valores límite se encuentran 12 registros.
- iv. Se repiten los pasos ii y iii hasta agrupar todos los registros de la base de datos.
- Tabla 4-9. Lista de registros utilizados para el caso de estudio 4 ordenados por valor de  $T_0$  en forma ascendente (registros obtenidos en la zona central de Chile).

Reg ID	Estación	T <sub>0</sub> [s]	Reg ID	Estación	T <sub>0</sub> [s]
20146	STL	0.052493	20017	VALP08R	0.434783
20149	ROC1	0.101010	20038	VALP08R	0.434783
72479	VA03	0.127389	20141	VALP08R	0.434783
90024	VA03	0.127389	20127	STGO02R	0.478469
90034	VA03	0.127389	20128	STGO03R	0.495050
90044	VA03	0.127389	20021	VALP07S	0.534759
20016	VALP02S	0.129870	20137	VALP02R	0.540541
90064	V02A	0.137363	20151	OLMU	0.684932
90076	V02A	0.137363	20026	VALP06R	0.689655

91000	V02A	0.137363	20093	VALP06R	0.689655
91004	V02A	0.137363	20139	VALP06R	0.689655
91005	V02A	0.137363	20008	STGO03S	0.694444
91006	V02A	0.137363	20145	SJCH	0.709220
20050	VALP04R	0.243902	20150	CSCH	0.757576
20060	VALP04R	0.243902	20655	R13M	0.763359
20066	VALP04R	0.243902	91002	R13M	0.763359
20143	MELP	0.266667	20065	VALP03R	0.892857
20024	VALP01R	0.289855	20092	VALP03R	0.892857
20136	VALP01R	0.289855	20138	VALP03R	0.892857
20731	VALP01R	0.289855	91001	R12M	1.010101
20991	EN03TO	0.322581	20025	VALP13S	1.020408
20023	VALP11S	0.364964	20018	VALP04S	1.282051
91003	R18M	0.370370	20653	R07M	1.282051
20126	STGO01R	0.413223	20022	VALP10S	2.439024

El número de estaciones y de registros correspondientes a cada uno de los grupos definidos utilizando la metodología descrita anteriormente (considerando únicamente los valores de  $T_0$ ) se muestran en la Tabla 4-10 para el análisis de todo el territorio chileno y en la Tabla 4-11 para el análisis de la zona central de Chile. El valor de  $T_0$  de cada grupo que se muestra en las tablas se obtuvo calculando el valor mediano de  $T_0$  de las estaciones que conforman cada grupo.

Se puede observar en la Tabla 4-10 que para el análisis con los datos de todo el territorio chileno se pudieron formar 91 grupos los cuales contienen desde 1 solo registro (9 grupos) hasta 53 registros (grupo 7) y que el número de estaciones va desde 1 (11 grupos) hasta 20 (3 grupos).

En la Tabla 4-11 se observa que para el análisis con los datos de la zona central de Chile se pudieron formar 28 grupos los cuales contienen desde 1 solo registro (3 grupos) hasta 13 registros (grupo 1) y que el número de estaciones va desde 1 (6 grupos) hasta 6 (grupo 18).

Tabla 4-10. Número de estaciones y de registros por grupo, clasificando en función del valor de T<sub>0</sub> (registros obtenidos en todo el territorio chileno).

Cmuno	N° de	N° de	T. [a]
Grupo	estaciones	registros	
1	14	32	0.13
2	13	34	0.13
3	12	33	0.13
4	12	33	0.13
5	13	34	0.14
6	13	36	0.14
7	20	53	0.17
8	20	50	0.18
9	20	52	0.18
10	19	49	0.19
11	18	46	0.19
12	17	45	0.19
13	16	39	0.21
14	15	36	0.21
15	19	38	0.22
16	19	38	0.23
17	18	37	0.23
18	18	37	0.23
19	19	38	0.23
20	18	37	0.23
21	17	36	0.24
22	16	33	0.24
23	16	32	0.25
24	15	31	0.26
25	14	28	0.26
26	13	23	0.27
27	12	22	0.28
28	13	21	0.29
29	17	25	0.29
30	16	24	0.30
31	15	23	0.31
32	15	23	0.31
33	14	22	0.32
34	15	26	0.34
35	14	23	0.35
36	13	19	0.35
37	13	18	0.36

Grupo	N° de	N° de	
Grupo	estaciones	registros	10[5]
38	12	17	0.36
39	12	19	0.37
40	11	18	0.37
41	10	17	0.37
42	9	16	0.37
43	8	15	0.37
44	8	14	0.37
45	7	12	0.39
46	6	11	0.40
47	5	11	0.41
48	8	13	0.47
49	7	12	0.47
50	8	14	0.48
51	8	12	0.48
52	9	14	0.51
53	8	13	0.52
54	7	12	0.52
55	6	9	0.53
56	5	8	0.54
57	6	14	0.58
58	5	12	0.60
59	4	11	0.60
60	4	11	0.60
61	6	13	0.61
62	7	14	0.69
63	7	12	0.70
64	9	17	0.71
65	8	16	0.72
66	7	13	0.73
67	6	12	0.75
68	6	11	0.76
69	5	10	0.77
70	5	9	0.78
71	4	8	0.78
72	3	6	0.79
73	3	6	0.87
74	2	4	0.89

Grupo	N° de estaciones	N° de registros	T <sub>0</sub> [s]
75	1	3	0.89
76	4	5	1.06
77	3	4	1.06
78	2	3	1.06
79	1	1	1.09
80	3	3	1.28
81	1	1	1.37
82	1	1	1.49
83	2	4	1.89
84	1	1	1.92
85	1	1	2.11
86	2	2	2.41
87	1	1	2.44
88	1	1	3.12
89	1	1	4.76
90	1	3	7.14
91	1	1	8.33

Tabla 4-11. Número de estaciones y de registros por grupo, clasificando en función del valor de T<sub>0</sub> (registros obtenidos en la zona central de Chile).

Grupo	N° de	N° de	T <sub>e</sub> [e]
Grupo	estaciones	registros	10[8]
1	5	13	0.13
2	4	12	0.13
3	3	11	0.14
4	2	7	0.14
5	1	6	0.14
6	4	8	0.28
7	4	6	0.29
8	4	6	0.31
9	4	4	0.37
10	4	6	0.42
11	3	5	0.43
12	4	6	0.43
13	4	6	0.46
14	4	4	0.51

Grupo	N° de estaciones	N° de registros	T <sub>0</sub> [s]
15	3	3	0.53
16	2	2	0.54
17	1	1	0.54
18	6	9	0.69
19	5	8	0.70
20	4	5	0.76
21	3	4	0.76
22	2	3	0.76
23	1	2	0.76
24	1	3	0.89
25	2	2	1.01
26	1	1	1.02
27	2	2	1.28
28	1	1	2.44

#### 4.2 Normalización de un grupo de registros

La normalización es necesaria para disminuir la dispersión que existe entre ordenadas espectrales de un grupo de registros originados por eventos de distinta magnitud y obtenidos a distintas distancias a la fuente. El criterio de normalización de registros utilizado en este trabajo es el que se propone en FEMA (2009), criterio que consiste en normalizar los registros por la velocidad máxima de terreno (en adelante PGV, del inglés *peak ground velocity*). El criterio está basado en la correlación relativamente alta tanto entre PGV y magnitud como entre PGV y distancia a la fuente.

La normalización consiste en calcular un factor, el cual puede ser menor o mayor a 1, por el cual se multiplican las componentes de un registro. Las ecuaciones que propone FEMA (2009) para normalizar por PGV son las siguientes:

$$FN_{i} = \frac{Mediana(PGV_{G,i})}{PGV_{G,i}}$$
(4-1)

$$CHN_{1,i} = FN_i \times CH_{1,i} \tag{4-2}$$

$$CHN_{2,i} = FN_i \times CH_{2,i} \tag{4-3}$$

Donde:

- $FN_i$  =Factor de normalización de las dos componentes horizontales del registro *i*.
- $PGV_{G,i}$  =Promedio geométrico de los valores de PGV de las dos componentes horizontales del registro *i*.

 $mediana(PGV_{G,i})$  =Mediana de los valores de  $PGV_{G,i}$  de los registros de un conjunto.

 $CHN_{1,i}$  = Registro *i* normalizado, componente horizontal 1.

 $CHN_{2,i}$  = Registro *i* normalizado, componente horizontal 2.

 $CH_{1,i}$  =Componente horizontal 1 del registro *i*.

 $CH_{2,i}$  =Componente horizontal 2 del registro *i*.

Naturalmente, debido a que se trabaja con espectros de respuesta elásticos y lineales, la normalización puede realizarse antes o después de la construcción del espectro (normalizando el registro o el espectro elástico directamente). En este trabajo se realiza la construcción de los espectros de respuesta de todos los registros de la base de datos para posteriormente normalizarlos por PGV. La metodología considerada para la construcción de espectros de respuesta de desplazamiento y pseudo-velocidad es la descrita en la Sección 3.1.

Como ejemplo de normalización por PGV se muestra en la Figura 4-3 un grupo de 18 espectros de respuesta de pseudo-aceleración de registros sin normalizar mientras que en la Figura 4-4 se muestra el mismo grupo normalizado por PGV, disminuyendo la variabilidad que existe entre ordenadas espectrales sobre todo en la zona de períodos medios y altos. El grupo de espectros de este ejemplo considera registros sísmicos obtenidos en todo Chile y pertenecientes a un Suelo Tipo B según la Clasificación Actual.


Figura 4-3. Grupo de espectros de respuesta de pseudo-aceleración sin normalizar (registros obtenidos en todo Chile correspondientes a un Suelo Tipo B según la Clasificación Actual).



Figura 4-4. Grupo de espectros de respuesta de pseudo-aceleración normalizados por PGV (registros obtenidos en todo Chile correspondientes a un Suelo Tipo B según la Clasificación Actual).

## 4.3 Construcción de la forma espectral de Newmark-Hall de un grupo de registros

El procedimiento mediante el cual se caracterizaron los parámetros espectrales de Newmark-Hall es ilustrado considerando el grupo de registros obtenidos en todo el territorio de Chile para un Suelo Tipo B según la Clasificación Actual.

- El grupo de registros es normalizado por PGV considerando la metodología de FEMA (2009) descrita en la sección anterior. En la Figura 4-4 se muestran los espectros de respuesta de pseudo-aceleración construidos a partir de los registros normalizados.
- 2) Se construye el espectro de pseudo-aceleración representativo del conjunto. Como espectro representativo se considera el espectro percentil 50, formado por las medianas de las ordenadas espectrales del conjunto en cada periodo de vibración natural (Figura 4-5). Posteriormente las ordenadas espectrales de pseudo-aceleración son convertidas a ordenadas espectrales de desplazamiento tal como se muestra en la Figura 4-6.
- 3) Se determina el espectro de Newmark-Hall simplificado que mejor ajusta al espectro de desplazamiento obtenido en el paso anterior para obtener el periodo  $T_d$ . El espectro determinado para este ejemplo se muestra en la Figura 4-7 donde se obtiene un periodo  $T_d = 1.87$  s.
- 4) Se determina el espectro de Newmark-Hall que mejor ajusta el espectro de pseudoaceleración determinado en el paso 2. El valor de  $T_d$  obtenido en el paso anterior es utilizado como dato de entrada para el algoritmo que determina el mejor ajuste. Del ajuste se obtienen los parámetros espectrales  $T_b = 0.12$  s ,  $T_c = 0.26$  s y  $\alpha_A =$ 3.04 (ver Figura 4-8)



Figura 4-5. Espectro Percentil 50 del grupo de espectros de respuesta de pseudoaceleración normalizados por PGV (registros obtenidos en todo Chile correspondientes a un Suelo Tipo B según la Clasificación Actual).



Figura 4-6. Espectro Percentil 50 de desplazamiento (registros obtenidos en todo Chile correspondientes a un Suelo Tipo B según la Clasificación Actual).



Figura 4-7. Ajuste del Espectro de diseño de Newmark-Hall al espectro Percentil 50 de desplazamiento (registros obtenidos en todo Chile correspondientes a un Suelo Tipo B según la Clasificación Actual).



Figura 4-8. Ajuste del Espectro de diseño de Newmark-Hall al espectro Percentil 50 de pseudo-aceleración (registros obtenidos en todo Chile correspondientes a un Suelo Tipo B según la Clasificación Actual).

### 5 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se describen los resultados del ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall al espectro percentil 50 de los distintos grupos de cada uno de los casos de estudio descritos en el capítulo anterior en la Sección 4.1. Se muestran comparaciones entre los espectros de la norma actual de diseño sísmico de edificios NCh433 y los construidos a partir del agrupamiento de registros según la Clasificación Actual de suelos y según la Clasificación SOCHIGE. Además, se comparan las formas espectrales considerando la Clasificación Actual con los obtenidos considerando la Clasificación SOCHIGE.

Se estudian las relaciones que existen entre los parámetros espectrales que definen el espectro de Newmark-Hall y los principales parámetros de caracterización de suelo, analizando posibles relaciones entre los parámetros espectrales y los parámetros de caracterización del suelo (e.g.  $T_0$  y  $T_c$ ). Estas relaciones son evaluadas cualitativa y cuantitativamente teniendo en cuenta características ya definidas en la literatura.

En cada sección se muestran los resultados tanto para el caso en que se consideran registros obtenidos en todo Chile como para el caso en que se consideran sólo registros de la zona central de Chile. En ambos casos con y sin considerar la direccionalidad.

#### 5.1 Formas espectrales utilizando la Clasificación Actual de suelos

Las formas espectrales de Newmark-Hall definidas en esta sección corresponden al análisis de los registros agrupados utilizando la Clasificación Actual tal como se muestra en la Sección 4.1.1. Los resultados del ajuste del espectro de diseño se muestran en Tablas y gráficamente. No se reportan valores para Suelo Tipo E debido a que utilizando esta clasificación ningún registro de la base de datos se encuentra dentro de los valores de  $V_{s30}$  correspondientes a este tipo de suelo.

#### 5.1.1 Todo Chile

La Tabla 5-1 muestra los resultados obtenidos considerando registros obtenidos en todo Chile y sin considerar la direccionalidad. Se observa que el valor de  $\alpha_A$  tiende a disminuir a medida que aumenta la flexibilidad del suelo (tendencia opuesta a los valores de  $\alpha_A$  en la NCh2745). El valor de  $T_c$  aumenta a medida que aumenta la flexibilidad del suelo, tendencia idéntica a los valores de  $T_c$  en todos los códigos de diseño sísmico. El valor de la relación  $T_b/T_c$  decrece a medida que aumenta la flexibilidad del suelo, contrastando con el valor constante de ASCE 7 (i.e. = 0.20).

Las Figuras 5-1, 5-2, 5-3 y 5-4 muestran el ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall para los Suelos Tipo A, B, C y D, respectivamente. Se observa que en general se obtienen ajustes de buena calidad con coeficientes de determinación mayores a 0.94.

La Figura 5-5 ilustra los espectros determinados normalizados por el área comprendida entre el espectro y el eje de las abscisas (1.0 g s, valor arbitrario de referencia). Se observa inmediatamente que en la zona de periodos altos el valor de las ordenadas espectrales no aumenta con la flexibilidad del suelo, lo cual sí debería ocurrir (característica bien conocida de los espectros de Newmark-Hall). En la Figura 5-6 se muestran los mismos espectros pero normalizados de forma tal que para periodos mayores que  $T_d$  los desplazamientos espectrales sean iguales a 21 cm, 24 cm, 27 cm y 30 cm para Suelos Tipo A, B, C y D, respectivamente. Se observa que en tal caso el valor de las ordenadas espectrales sí aumenta con la flexibilidad del suelo en la zona de periodos altos, pero a costa de ordenadas espectrales irrealmente altas en la zona de periodos cortos.

Se analizó la posible influencia de la direccionalidad considerando el grupo de registros obtenidos en todo el territorio de Chile agrupados según la Clasificación Actual de suelos. Los resultados al considerar direccionalidad (Tabla 5-2), son en general similares a los resultados correspondientes al caso en que no se considera direccionalidad (Tabla 5-1). La relación monotónica entre el tipo de suelo y el valor de parámetros espectrales se mantiene en el caso de  $T_c$  pero no en el caso de  $\alpha_A$  y  $T_d$ . En cualquier caso, las pocas diferencias no resultan en espectros significativamente diferentes. Las comparaciones entre los espectros normalizados mostradas en las Figuras 5-7, 5-8, 5-9 y 5-10 indican que la influencia de la direccionalidad no parece ser relevante.

Tabla 5-1. Parámetros espectrales: registros obtenidos en todo Chile, Clasificación

Actual,	sın	direcciona	lidad.

Suelo Tipo	PGA [g]	αΑ	<b>T</b> <sub>b</sub> [ <b>s</b> ]	<b>T</b> <sub>c</sub> [ <b>s</b> ]	<b>T</b> <sub>d</sub> [ <b>s</b> ]
Α	0.14	3.59	0.17	0.17	3.18
В	0.13	3.04	0.12	0.26	1.86

С	0.12	2.52	0.13	0.39	1.58
D	0.12	2.54	0.13	0.47	0.83

Tabla 5-2. Parámetros espectrales: registros obtenidos en todo Chile, Clasificación

Suelo Tipo	PGA [g]	αΑ	T <sub>b</sub> [s]	<b>T</b> <sub>c</sub> [ <b>s</b> ]	Td [8]
Α	0.11	4.30	0.15	0.18	3.27
В	0.13	3.20	0.12	0.26	1.75
С	0.12	2.59	0.13	0.39	1.82
D	0.11	2.96	0.14	0.44	0.86

Actual, con direccionalidad.



Figura 5-1. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo A. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación Actual).



Figura 5-2. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo B. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación Actual).



Figura 5-3. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo C. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación Actual).



Figura 5-4. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo D. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación Actual).



Figura 5-5. Formas espectrales normalizadas (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación Actual, sin direccionalidad).



Figura 5-6. Formas espectrales normalizadas a desplazamientos máximos iguales a 21 cm, 24 cm, 27 cm y 30 cm para Suelos Tipo A, B, C y D respectivamente (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación Actual, sin direccionalidad).



Figura 5-7. Influencia de la direccionalidad: Suelo Tipo A (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación Actual).



Figura 5-8. Influencia de la direccionalidad: Suelo Tipo B (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación Actual).



Figura 5-9. Influencia de la direccionalidad: Suelo Tipo C (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación Actual).



Figura 5-10. Influencia de la direccionalidad: Suelo Tipo D (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación Actual).

#### 5.1.2 Zona central de Chile

Las Tablas 5.3 y 5.4 muestran los resultados al considerar registros obtenidos sólo en la zona central de Chile sin y con direccionalidad, respectivamente. En ambos casos se observa poca correlación entre el tipo de suelo y los parámetros espectrales ya que no se observa una tendencia clara en los valores de cada parámetro.

Las Figuras 5-11, 5-12, 5-13 y 5-14 muestran el ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall para los Suelos Tipo A, B, C y D, respectivamente. Se observa que en general la calidad del ajuste del espectro de diseño es buena, pero para el Suelo Tipo A se tiene un coeficiente de determinación de 0.80 al considerar direccionalidad. Este ajuste de relativamente bja calidad se debe probablemente a la limitada cantidad de registros de este tipo de suelo. Además, nuevamente se observa que la influencia de la direccionalidad no parece ser relevante puesto que las pocas diferencias no resultan en espectros significativamente diferentes.

Se analizó luego la posible relevancia de considerar sólo los registros obtenidos en la zona central de Chile. Se observa que en este caso los resultados son cuantitativa y cualitativamente diferentes respecto de los reportados en las Tablas 5.1 y 5.2 (registros

obtenidos en todo Chile). Sin embargo, las comparaciones entre espectros normalizados mostradas en las Figuras 5-15, 5-16, 5-17 y 5-18 indican que la influencia en la forma espectral sólo es significativa en la zona de periodos cortos, sobre todo en el caso de los suelos más firmes (Tipos A y B).

Tabla 5-3. Parámetros espectrales: registros obtenidos sólo en la zona central de Chile,Clasificación Actual, sin direccionalidad.

Suelo Tipo	PGA [g]	αΑ	<b>T</b> <sub>b</sub> [ <b>s</b> ]	<b>T</b> <sub>c</sub> [ <b>s</b> ]	<b>T</b> <sub>d</sub> [ <b>s</b> ]
Α	0.13	3.10	0.26	0.27	2.20
В	0.09	2.85	0.17	0.46	2.05
С	0.10	3.58	0.28	0.31	2.26
D	0.11	2.61	0.14	0.61	0.78

Tabla 5-4. Parámetros espectrales: registros obtenidos sólo en la zona central de Chile,Clasificación Actual, con direccionalidad.

Suelo Tipo	PGA [g]	αΑ	<b>T</b> <sub>b</sub> [ <b>s</b> ]	<b>T</b> <sub>c</sub> [ <b>s</b> ]	<b>T</b> <sub>d</sub> [ <b>s</b> ]
Α	0.12	4.26	0.29	0.29	1.95
В	0.11	2.78	0.20	0.44	2.38
С	0.09	3.89	0.27	0.33	2.61
D	0.12	2.55	0.17	0.57	0.82



Figura 5-11. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo A. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en la zona central de Chile, Clasificación Actual).



Figura 5-12. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo B. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en la zona central de Chile, Clasificación Actual).



Figura 5-13. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo C. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en la zona central de Chile, Clasificación Actual).



Figura 5-14. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo D. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en la zona central de Chile, Clasificación Actual).



Figura 5-15. Influencia de la zona considerada: Suelo Tipo A (Clasificación Actual, sin direccionalidad).



Figura 5-16. Influencia de la zona considerada: Suelo Tipo B (Clasificación Actual, sin direccionalidad).



Figura 5-17. Influencia de la zona considerada: Suelo Tipo C (Clasificación Actual, sin direccionalidad).



Figura 5-18. Influencia de la zona considerada: Suelo Tipo D (Clasificación Actual, sin direccionalidad).

#### 5.1.3 Comparación con los espectros de la normativa actual

Se comparan las formas espectrales de diseño obtenidas al considerar los registros sísmicos agrupados según la Clasificación Actual con los espectros que establece la NCh433. Las comparaciones se realizan normalizando los espectros de Newmark-Hall a la misma área de los espectros de diseño de la norma actual (área comprendida entre el espectro y el eje de las abscisas).

Las Figuras 5-19, 5-20, 5-21 y 5-22 ilustran las comparaciones entre espectros para Suelos Tipo A, B, C y D respectivamente, considerando el grupo de registros obtenidos en todo el territorio de Chile. Se puede observar que las formas espectrales de Newmark-Hall obtenidas para los Suelos Tipo A, B y C muestran buena similitud con los espectros de la NCh433 en los periodos largos, pero no en los periodos cortos. Sin embargo, al comparar el Suelo Tipo D se observa que no hay similitud alguna entre espectros.

Las Figuras 5-23, 5-24, 5-25 y 5-26 ilustran las comparaciones entre los espectros de la NCh433 y las formas espectrales normalizadas obtenidas para Suelos Tipo A, B, C y D, respectivamente, considerando el grupo de registros obtenidos sólo en la Zona Central de Chile. Se puede observar que el comportamiento descrito en el párrafo anterior se mantiene: los espectros obtenidos para los Suelos Tipo A, B y C muestran similitud con los de la NCh433 en los periodos largos y el obtenido para Suelo Tipo D no presenta similitud. Algo naturalmente esperado, ya que como se observó en las comparaciones de la Sección 5.1.3, la influencia de la zona considerada parece no tener gran relevancia.



Figura 5-19. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo A sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación Actual).



Figura 5-20. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo B sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación Actual).



Figura 5-21. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo C sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación Actual).



Figura 5-22. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo D sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación Actual).



Figura 5-23. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo A sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central de Chile, Clasificación Actual).



Figura 5-24. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo B sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central de Chile, Clasificación Actual).



Figura 5-25. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo C sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central de Chile, Clasificación Actual).



Figura 5-26. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo D sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central de Chile, Clasificación Actual).

#### 5.2 Formas espectrales utilizando la Clasificación SOCHIGE

Las formas espectrales de Newmark-Hall definidas en esta sección corresponden al análisis de los registros considerando la Clasificación SOCHIGE tal como se muestra en la Sección 4.1.2. Los resultados del ajuste se muestran resumidos en Tablas y también gráficamente. Es importante notar que según la Clasificación SOCHIGE algunos registros sí fueron obtenidos en Suelo Tipo E.

#### 5.2.1 Todo Chile

La Tabla 5-5 muestra los parámetros espectrales obtenidos considerando registros obtenidos en todo Chile y sin considerar direccionalidad. Se observa que el valor de  $T_c$  mantiene el comportamiento observado anteriormente: aumenta a medida que el suelo es más flexible. Para los Suelos Tipo A, B, C y D se observa que el valor de  $\alpha_A$  decrece a medida que el suelo es más flexible, pero tal característica no se mantiene para el Suelo Tipo E. Se puede observar que las relaciones monotónicas entre el tipo de suelo y el valor de los parámetros espectrales se mantiene al considerar direccionalidad (Tabla 5-6).

Las Figuras 5-27, 5-28, 5-29, 5-30 y 5-31 muestran el ajuste del espectro de diseño para los Suelos Tipo A, B, C, D y E respectivamente, considerando registros obtenidos en todo Chile. En general se observan ajustes de buena calidad. Además, se observa inmediatamente que no se presentan diferencias relevantes al considerar direccionalidad en los registros.

Tabla 5-5. Parámetros espectrales: registros obtenidos en todo Chile,	Clasificación
SOCHIGE, sin direccionalidad.	

Suelo Tipo	PGA [g]	αΑ	<b>T</b> <sub>b</sub> [ <b>s</b> ]	<b>T</b> <sub>c</sub> [ <b>s</b> ]	Td [s]
Α	0.11	4.72	0.16	0.17	2.96
В	0.14	2.92	0.11	0.25	1.92
С	0.13	2.83	0.12	0.29	1.92
D	0.12	2.60	0.12	0.45	0.85
E	0.07	3.00	0.28	0.74	1.13

Suelo Tipo	PGA [g]	αΑ	<b>T</b> <sub>b</sub> [ <b>s</b> ]	<b>T</b> <sub>c</sub> [ <b>s</b> ]	<b>T</b> <sub>d</sub> [s]
Α	0.10	5.42	0.16	0.17	2.93
В	0.16	2.73	0.13	0.26	1.37
С	0.13	2.80	0.13	0.29	2.02
D	0.12	2.76	0.13	0.43	0.89
Е	0.07	3.43	0.27	0.74	1.10

 Tabla 5-6. Parámetros espectrales: registros obtenidos en todo Chile, Clasificación

 SOCHIGE, con direccionalidad.



Figura 5-27. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo A. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación SOCHIGE).



Figura 5-28. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo B. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación SOCHIGE).



Figura 5-29. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo C. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación SOCHIGE).



Figura 5-30. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo D. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación SOCHIGE).



Figura 5-31. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo E. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación SOCHIGE).



Figura 5-32. Formas espectrales normalizadas (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación SOCHIGE, sin direccionalidad).

La Figura 5-32 ilustra los espectros determinados normalizados por el área comprendida entre el espectro y el eje de las abscisas (1.0 g s, valor arbitrario de referencia). Es posible notar que las conocidas relaciones entre valores de ordenadas espectrales y tipos de suelo se verifican en la zona de periodos cortos (mayor valor de ordenada espectral a mayor rigidez del suelo) y en la zona de periodos medios (menor valor de ordenada espectral a mayor rigidez del suelo) pero no en la zona de periodos largos (misma relación para periodos medios).

Se analizó la posible relevancia de considerar la Clasificación SOCHIGE. Las comparaciones entre espectros normalizados mostradas en las Figuras 5-33, 5-34, 5-35 y 5-36 indican que la Clasificación SOCHIGE sólo introduce cambios relevantes en el Suelo Tipo C, y sólo en la zona de períodos cortos.



Figura 5-33. Influencia de la clasificación de suelo: Suelo Tipo A (registros obtenidos en todo Chile, sin direccionalidad).



Figura 5-34. Influencia de la clasificación de suelo: Suelo Tipo B (registros obtenidos en todo Chile, sin direccionalidad).



Figura 5-35. Influencia de la clasificación de suelo: Suelo Tipo C (registros obtenidos en todo Chile, sin direccionalidad).



Figura 5-36. Influencia de la clasificación de suelo: Suelo Tipo D (registros obtenidos en todo Chile, sin direccionalidad).

#### 5.2.2 Zona central de Chile

Las Tablas 5-7 y 5-8 muestran los parámetros obtenidos al considerar sólo registros de la Zona Central de Chile. Se observa que la relación monotónica entre el tipo de suelo y el valor de parámetros espectrales se mantiene en el caso de  $T_c$  y  $\alpha_A$  a partir del Suelo Tipo B en adelante. Se observa que el factor de amplificación  $\alpha_A$  disminuye a medida que el suelo es más flexible, mientras que el valor de  $T_c$  aumenta. Para el caso en que no se considera la direccionalidad se puede observar que el valor del periodo  $T_d$  disminuye a medida que el suelo es más flexible.

Las Figuras 5-37, 5-38, 5-39, 5-40 y 5-41 muestran el ajuste del espectro de diseño del espectro percentil 50 para los Suelos Tipo A, B, C, D y E respectivamente. En general se observan buenos ajustes con coeficientes de determinación mayores o iguales a 0.95. Sin embargo, para el Suelo Tipo A, a pesar de tener un ajuste con coeficientes de determinación de 0.96 y 0.98, no se obtienen resultados congruentes con lo esperado para un suelo rígido. Naturalmente, tal incongruencia es probablemente debida a que se cuenta con muy pocos registros de este tipo de suelo (2 registros).

Tabla 5-7. Parámetros espectrales: registros obtenidos sólo en la zona central de Chile,Clasificación SOCHIGE, sin direccionalidad.

Suelo Tipo	PGA [g]	αΑ	<b>T</b> <sub>b</sub> [ <b>s</b> ]	<b>T</b> <sub>c</sub> [ <b>s</b> ]	<b>T</b> <sub>d</sub> [ <b>s</b> ]
Α	0.06	2.62	0.12	0.76	2.38
В	0.13	3.01	0.27	0.27	2.17
С	0.10	3.00	0.16	0.42	2.04
D	0.11	2.66	0.21	0.54	0.82
E	0.11	2.62	0.20	0.68	0.81

Tabla 5-8. Parámetros espectrales: registros obtenidos sólo en la zona central de Chile,Clasificación SOCHIGE, con direccionalidad.

Suelo Tipo	PGA [g]	αΑ	<b>T</b> <sub>b</sub> [ <b>s</b> ]	<b>T</b> <sub>c</sub> [ <b>s</b> ]	Td [s]
Α	0.06	3.35	0.13	0.67	2.31
В	0.14	3.43	0.28	0.28	1.86
С	0.08	3.34	0.11	0.44	3.26
D	0.09	3.29	0.20	0.58	0.83
E	0.11	2.61	0.18	0.69	0.84



Figura 5-37. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo A. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central de Chile, Clasificación SOCHIGE).



Figura 5-38. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo B. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central de Chile, Clasificación SOCHIGE).



Figura 5-39. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo C. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central de Chile, Clasificación SOCHIGE).



Figura 5-40. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo D. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central de Chile, Clasificación SOCHIGE).



Figura 5-41. Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall. Suelo Tipo E. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos sólo en la zona central de Chile, Clasificación SOCHIGE).

#### 5.2.3 Comparación con los espectros de la normativa actual

Se comparan las formas obtenidas considerando registros obtenidos en todo Chile agrupados según la Clasificación SOCHIGE con los espectros de diseño que establece la NCh433. Las Figuras 5-42, 5-43, 5-44, 5-45 y 5-46 muestran las comparaciones para Suelos Tipo A, B, C, D y E, respectivamente, sin considerar direccionalidad. Se puede observar que los espectros de diseño obtenidos para los Suelos Tipo A y B son los que más se asemejan a los establecidos por la norma actual de diseño sísmico. Los espectros que se obtienen para los Suelos Tipo D y E no presentan similitud alguna con los que establece la normativa actual.



Figura 5-42. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo A sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación SOCHIGE).



Figura 5-43. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo B sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación SOCHIGE).



Figura 5-44. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo C sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación SOCHIGE).



Figura 5-45. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo D sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación SOCHIGE).



Figura 5-46. Comparación con los espectros de la NCh433: Suelo Tipo E sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b) (registros obtenidos en todo Chile, Clasificación SOCHIGE).

# 5.3 Formas espectrales utilizando el valor de V<sub>s30</sub> como parámetro de clasificación del suelo

Las formas espectrales obtenidas en esta sección corresponden a los registros agrupados utilizando únicamente el valor de  $V_{s30}$  como parámetro de caracterización, tal como se indicó en la Sección 4.1.3. Algunos de los grupos son descartados de los resultados al no lograr un ajuste del espectro de diseño de buena calidad (coeficiente de determinación muy bajo). En general el mal ajuste se debe al limitado número de registros de algunos grupos. El ajuste de la forma espectral de Newmark-Hall al espectro percentil 50 de cada uno de los grupos se muestra en el Anexo D.

A manera de evaluar el valor de  $V_{s30}$  como parámetro de caracterización de suelo se analizan las relaciones entre el valor de  $V_{s30}$  de cada grupo de registros y los parámetros que definen la forma del espectro de diseño (periodos  $T_b$ ,  $T_c$ ,  $T_d$  y factor de amplificación  $\alpha_A$ ).
#### 5.3.1 Todo Chile

Las Figuras 5-47, 5-48, 5-49 y 5-50 ilustran las relaciones que existen entre el valor de  $V_{s30}$  y los parámetros  $T_c$ ,  $\alpha_A$ ,  $T_c/T_b$  y  $T_d$ , respectivamente.

Verificando lo que se esperaría según la literatura, se observa que el valor de  $T_c$  presenta una tendencia general a aumentar mientras la rigidez del suelo disminuye. Sin embargo, tal tendencia no es tan clara debido a la alta dispersión que existe entre resultados. El valor de  $\alpha_A$  tiende a aumentar hacia los suelos más rígidos, sin embargo nuevamente se presenta una dispersión considerable. El mismo problema de dispersión se presenta al evaluar la razón  $T_c/T_b$  la cual, acorde a ASCE-7 debería ser constante. Donde se presenta una menor dispersión es en la relación entre el valor de  $V_{s30}$  y el de  $T_d$ . Claramente el valor de este periodo disminuye a medida que la rigidez del suelo disminuye.



Figura 5-47. Relación entre el valor de  $V_{s30}$  y el periodo T<sub>c</sub>. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b).



Figura 5-48. Relación entre el valor de  $V_{s30}$  y el factor de amplificación  $\alpha_A$ . Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b).



Figura 5-49. Relación entre el valor de  $V_{s30}$  y la razón  $T_c/T_b$ . Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b).



Figura 5-50. Relación entre el valor de  $V_{s30}$  y el periodo T<sub>d</sub>. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b).

#### 5.3.2 Zona central de Chile

Las mismas relaciones entre el valor de  $V_{s30}$  y los parámetros espectrales se muestran en las Figuras 5-51, 5-52, 5-53 y 5-54 considerando espectros de registros obtenidos sólo en la zona central de Chile. Se observa que las relaciones monotónicas mantienen el mismo comportamiento observado al considerar registros de todo Chile. A medida que el suelo es más flexible el valor de  $T_c$  aumenta mientras que el factor de amplificación  $\alpha_A$  y el periodo  $T_d$  decrecen. Nuevamente se presenta el mismo problema: en general se observa una gran dispersión en los resultados. Naturalmente, debido al limitado número de registros al considerar únicamente la zona central, se observa que se obtienen tendencias claramente definidas.



Figura 5-51. Relación entre el valor de  $V_{s30}$  y el periodo T<sub>c</sub>. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b).



Figura 5-52. Relación entre el valor de  $V_{s30}$  y el factor de amplificación  $\alpha_A$ . Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b).



Figura 5-53. Relación entre el valor de  $V_{s30}$  y la razón  $T_c/T_b$ . Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b).



Figura 5-54. Relación entre el valor de  $V_{s30}$  y el periodo  $T_d$ . Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b).

# 5.4 Formas espectrales utilizando el valor de T<sub>0</sub> como parámetro de clasificación del suelo

Las formas espectrales definidas en esta sección corresponden a los registros agrupados utilizando únicamente el valor de  $T_0$  como parámetro de caracterización tal como se muestra en la Sección 4.1.4. Algunos de los grupos son descartados de los resultados al no lograr un ajuste del espectro de diseño de buena calidad (coeficiente de determinación muy bajo). El ajuste de la forma espectral de Newmark-Hall de cada uno de los grupos considerados se muestra en el Anexo E.

#### 5.4.1 Todo Chile

Las Figuras 5-55, 5-56, 5-57 y 5-58 ilustran las relaciones que existen entre el valor de  $T_0$  y los parámetros  $T_c$ ,  $\alpha_A$ ,  $T_c/T_b$  y  $T_d$ , respectivamente. Se puede observar que el valor de  $T_c$  aumenta a medida que la rigidez del suelo disminuye. Además, para periodos predominantes entre 0.10 y 0.70 los valores de  $T_0$  y  $T_c$  tienden a ser muy similares. Respecto a los parámetros  $\alpha_A$  y  $T_d$ , se observa que ambos valores decrecen a medida que la rigidez del suelo disminuye (tendencia que se ha observado claramente en todos los casos de estudio).

Si bien las relaciones encontradas entre el tipo de suelo y el valor de los parámetros espectrales presentan la misma tendencia al considerar  $V_{s30}$  o  $T_0$ , se observa en general una mejor correlación al considerar  $T_0$  como parámetro de caracterización. Esto se hace evidente al observar que la dispersión en los gráficos es menor y que las líneas de tendencia presentan un mayor coeficiente de determinación. La única excepción es el periodo  $T_d$ , el cual aparentemente se correlaciona de una mejor forma con el  $V_{s30}$ .



Figura 5-55. Relación entre el valor de T<sub>0</sub> y el periodo T<sub>c</sub>. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b).



Figura 5-56. Relación entre el valor de  $T_0$  y el factor de amplificación  $\alpha_A$ . Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b).



Figura 5-57. Relación entre el valor de  $T_0$  y la razón  $T_c/T_b$ . Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b).



Figura 5-58. Relación entre el valor de  $T_0$  y el periodo  $T_d$ . Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b).

#### 5.4.1 Zona central de Chile

Las mismas relaciones entre el valor de  $T_0$  y los parámetros espectrales se muestran en las Figuras 5-59, 5-60, 5-61 y 5-62 considerando espectros de registros obtenidos sólo en la zona central de Chile. Se observa que la relación monotónica entre el valor de  $T_0$  y el valor de los parámetros se mantiene. Se observa claramente que el valor de  $T_c$  tiende a ser el mismo que el del periodo predominante.

Al igual que al considerar registros de todo Chile se logran tendencias bien definidas, reduciendo de manera considerable la dispersión entre los valores de cada parámetro espectral en comparación con los resultados obtenidos utilizando el valor de  $V_{s30}$ . La única excepción es el valor del periodo  $T_d$ , el cual muestra la misma tendencia pero con una mayor dispersión.



Figura 5-59. Relación entre el valor de T<sub>0</sub> y el periodo T<sub>c</sub>. Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b).



Figura 5-60. Relación entre el valor de  $T_0$  y el factor de amplificación  $\alpha_A$ . Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b).



Figura 5-61. Relación entre el valor de  $T_0$  y la razón  $T_c/T_b$ . Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b).



Figura 5-62. Relación entre el valor de  $T_0$  y el periodo  $T_d$ . Sin direccionalidad(a) y con direccionalidad (b).

### 6 PROPUESTA DE FORMAS ESPECTRALES

En este capítulo se proponen de formas espectrales de tipo Newmark-Hall para las normas chilenas de diseño sísmico y se describen las consideraciones que se tomaron en cuenta para sustentar dicha propuesta.

La propuesta se basa en el análisis de los resultados realizado en el capítulo anterior. Como se observó anteriormente no existen diferencias relevantes en los resultados al considerar o no la direccionalidad, por lo cual la propuesta es elaborada en base a los resultados obtenidos sin considerar la direccionalidad y utilizando registros sísmicos de todo el territorio continental de Chile.

#### 6.1 Determinación de los parámetros espectrales

Para obtener los parámetros espectrales se analizan los distintos valores que podría tener cierto parámetro espectral para cierto tipo de suelo. Se analizan los valores obtenidos considerando cada caso de estudio, es decir, con las distintas formas de caracterizar el suelo que se estudian en este trabajo. Como ejemplo se muestran en la Tabla 6-1 los distintos valores de cada parámetro espectral para un Suelo Tipo C según los distintos casos de estudio.

Tabla 6-1.	Parámetros	espectrales	para un	Suelo	Tipo	C según	distintas	clasifica	ciones
			de s	suelos.					

Clasificación	PGA [g]	αΑ	<b>T</b> <sub>b</sub> [ <b>s</b> ]	<b>T</b> <sub>c</sub> [ <b>s</b> ]	T <sub>d</sub> [s]
Actual	0.12	2.52	0.13	0.39	1.58
SOCHIGE	0.13	2.83	0.12	0.29	1.92
V <sub>s30</sub>	0.11	3.26	0.14	0.40	1.48
T <sub>0</sub>	0.15	3.07	0.14	0.30	1.46

Los parámetros espectrales obtenidos utilizando la Clasificación Actual y la Clasificación SOCHIGE son los valores que se obtienen del ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall al espectro percentil 50 de cada tipo de suelo (resultados descritos en las Secciones 5.1.1 y 5.2.2 respectivamente). Los parámetros espectrales obtenidos utilizando el valor de  $V_{s30}$  y  $T_0$  de manera independiente y como único parámetro de caracterización fueron estimados utilizando las ecuaciones de las líneas de tendencia de las relaciones entre los

parámetros espectrales y los parámetros de caracterización del suelo. Dichas relaciones son descritas en las Secciones 5.3.1 y 5.4.1.

A manera de ejemplificar lo descrito en el párrafo anterior (sobre las relaciones entre parámetros espectrales y parámetros de caracterización de suelos), se muestra a continuación cómo fue obtenido el valor del factor de amplificación  $\alpha_A$ . Las relaciones entre el parámetro espectral y los parámetros de caracterización del suelo se muestran gráficamente en las Figuras 5-48 y 5-56 y quedan definidas por las siguientes ecuaciones:

$$\alpha_A = 1.98 + 0.003 \, V_{s30} \tag{6-1}$$

$$1.25 \\ 1.00 \\ 1.00 \\ 0.75 \\ 0.50 \\ 0.50 \\ 0.25 \\ 0.00 \\ 0.0 \\ 0.5 \\ 1.0 \\ 1.5 \\ 2.0 \\ 2.5 \\ 3.0 \\ 3.5 \\ 4.0 \\ Periodo [s]$$

$$\alpha_A = 3.67 - 1.72 T_0 \tag{6-2}$$

Figura 6-1. Comparación de la forma propuesta con las formas definidas según cada clasificación para Suelo Tipo C.

Los valores de  $V_{s30}$  y  $T_0$  que se consideraron como datos para las ecuaciones 6-1 y 6-2 corresponden al valor mediano entre los límites que establecen la Clasificación Actual y la Clasificación SOCHIGE para cada tipo de suelo (Tabla 1-2). En el caso de un Suelo Tipo C se tiene que el valor de  $V_{s30}$  varía entre 350 m/s y 500 m/s y el valor  $T_0$  entre 0.30 s y 0.40 s, por lo cual para aplicar la ecuación se considera  $V_{s30} = 425$  m/s y  $T_0 = 0.35$  s. Finalmente, se proponen valores dentro de lo racional que promedien (de manera ponderada) los distintos espectros obtenidos. Para la elección de dichos valores se tomaron en consideración los distintos coeficientes de determinación obtenidos tanto para los ajustes del espectro de diseño como para la línea de tendencia obtenida en las relaciones descritas en las Secciones 5.3.1 y 5.4.1. La Figura 6-1 muestra el espectro de diseño propuesto para el Suelo Tipo C junto con los espectros construidos utilizando los parámetros que se muestran en la Tabla 6.1.

Este procedimiento fue adoptado para proponer una forma espectral para cada tipo de suelo. Las Tablas 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 y 6.6 muestran los parámetros espectrales obtenidos en cada caso de estudio para los Suelos Tipo A, B, C, D y E, respectivamente. Se muestran la mediana, el promedio, el promedio ponderado (considerando los coeficientes de determinación) y finalmente los valores propuestos. Se observa que para un Suelo Tipo A en general se obtienen valores de  $T_b$  y  $T_c$  prácticamente iguales entre sí, desapareciendo la meseta del espectro de Newmark-Hall. Debido a esto se decide proponer valores dentro de lo racional que caractericen de una forma adecuada la respuesta espectral de un Suelo Tipo A, de forma tal que visualmente sea consistente con los espectros obtenidos y con la forma tradicional de Newmark-Hall. Para los Suelos Tipo B, C, D y E se proponen básicamente los valores correspondientes al promedio ponderado de los parámetros PGA,  $\alpha_A$ ,  $T_b$  y  $T_c$ . El valor propuesto para  $T_d$  es ajustado (siempre dentro de valores racionales) de tal manera que dentro de los periodos largos (i.e.  $T_d > 2.0$  s) las respuestas espectrales de los distintos tipos de suelo no se crucen entre sí (característica bien conocida de los espectros de Newmark-Hall). Se observa que para un Suelo Tipo E no se muestran valores de  $T_d$  al considerar la clasificación por  $V_{s30}$  y  $T_0$ , debido a que las ecuaciones obtenidas de las líneas de tendencia no caracterizan de manera adecuada el comportamiento de dicho parámetro al utilizar valores de  $V_{s30}$  bajos y valores de  $T_0$  altos (suelos flexibles). Dichos valores son evaluados como no realistas y no son considerados.

Tabla 6-2. Parámetros espectrales obtenidos en cada caso de estudio y valores

propuestos	para un Sucio	про д.

Clasificación	PGA [g]	αA	T <sub>b</sub> [s]	Tc [8]	Td [s]
Actual	0.14	3.59	0.17	0.17	3.18
SOCHIGE	0.11	4.72	0.16	0.17	2.96
V <sub>s30</sub>	0.11	5.58	0.11	0.11	4.58

T <sub>0</sub>	0.19	3.52	0.15	0.15	1.88
Mediana	0.13	4.16	0.16	0.16	3.07
Promedio	0.14	4.15	0.15	0.16	2.88
Ponderado	0.14	4.13	0.16	0.16	2.96
Propuesta	0.14	3.40	0.11	0.18	2.60

Tabla 6-3. Parámetros espectrales obtenidos en cada caso de estudio y valorespropuestos para un Suelo Tipo B.

Clasificación	PGA [g]	αΑ	<b>T</b> <sub>b</sub> [ <b>s</b> ]	<b>T</b> <sub>c</sub> [ <b>s</b> ]	T <sub>d</sub> [s]
Actual	0.13	3.04	0.12	0.26	1.86
SOCHIGE	0.14	2.92	0.11	0.25	1.92
V <sub>s30</sub>	0.11	4.08	0.13	0.26	2.58
T <sub>0</sub>	0.17	3.28	0.14	0.21	1.66
Mediana	0.14	3.16	0.13	0.26	1.89
Promedio	0.14	3.33	0.13	0.25	2.01
Ponderado	0.14	3.26	0.12	0.24	2.03
Propuesta	0.14	3.26	0.12	0.24	2.05

Tabla 6-4. Parámetros espectrales obtenidos en cada caso de estudio y valorespropuestos para un Suelo Tipo C.

Clasificación	PGA [g]	ØΑ	<b>T</b> <sub>b</sub> [ <b>s</b> ]	Tc [8]	Td [8]
Actual	0.12	2.52	0.13	0.39	1.58
SOCHIGE	0.13	2.83	0.12	0.29	1.92
V <sub>s30</sub>	0.11	3.26	0.14	0.30	1.46
T <sub>0</sub>	0.15	3.07	0.14	0.30	1.46
Mediana	0.13	2.95	0.14	0.35	1.53
Promedio	0.13	2.92	0.13	0.35	1.61
Ponderado	0.13	2.88	0.13	0.34	1.63
Propuesta	0.13	2.90	0.13	0.35	1.73

Tabla 6-5. Parámetros espectrales obtenidos en cada caso de estudio y valores

propuestos para un Suelo Tipo D.

Clasificación	PGA [g]	0A	T <sub>b</sub> [s]	<b>T</b> <sub>c</sub> [ <b>s</b> ]	Td [s]
Actual	0.12	2.54	0.13	0.47	0.83
SOCHIGE	0.12	2.60	0.12	0.45	0.85

V <sub>s30</sub>	0.11	2.78	0.15	0.48	0.84
$T_0$	0.11	2.47	0.12	0.55	0.91
Mediana	0.12	2.57	0.13	0.48	0.85
Promedio	0.12	2.60	0.13	0.49	0.86
Ponderado	0.12	2.59	0.13	0.49	0.85
Propuesta	0.12	2.60	0.13	0.50	1.56

Tabla 6-6. Parámetros espectrales obtenidos en cada caso de estudio y valorespropuestos para un Suelo Tipo E.

Clasificación	PGA [g]	αA	<b>T</b> <sub>b</sub> [ <b>s</b> ]	<b>T</b> <sub>c</sub> [ <b>s</b> ]	T <sub>d</sub> [s]
SOCHIGE	0.07	3.00	0.28	0.74	1.13
V <sub>s30</sub>	0.11	2.39	0.15	0.54	-
T <sub>0</sub>	0.06	1.78	0.11	0.84	-
Mediana	0.07	2.39	0.15	0.74	1.13
Promedio	0.08	2.39	0.18	0.71	1.13
Ponderado	0.07	2.45	0.22	0.72	1.13
Propuesta	0.10	2.50	0.22	0.75	1.90

### 6.2 Forma espectral propuesta

La forma espectral propuesta queda definida por la Ecuación (6-3).

$$PGA\left(1 + \frac{\alpha_{A} - 1}{T_{b}}T_{n}\right) \qquad si T_{n} \leq T_{b}$$

$$\alpha_{A} \cdot PGA \qquad si T_{b} \leq T_{n} \leq T_{c}$$

$$\alpha_{A} \cdot PGA\left(\frac{T_{c}}{T_{n}}\right) \qquad si T_{c} \leq T_{n} \leq T_{d}$$

$$\alpha_{A} \cdot PGA\left(\frac{T_{c} \cdot T_{d}}{T_{n}^{2}}\right) \qquad si T_{n} \geq T_{d}$$
(6-3)

Los parámetros espectrales propuestos se muestran en la Tabla 6-7 y gráficamente se pueden ver las formas espectrales en la Figura 6-2. Los espectros se muestran

normalizados por el valor de PGA obtenido con la ley de atenuación propuesta por Montalva et al. (2017) con las consideraciones descritas en detalle en la próxima sección.

	Propuesta de formas espectrales									
Suelo Tipo	PGA [g]	αA	T <sub>b</sub> [s]	T <sub>c</sub> [s]	Td [s]					
А	0.21	3.40	0.11	0.18	2.60					
В	0.23	3.26	0.12	0.24	2.05					
С	0.25	2.90	0.13	0.35	1.73					
D	0.26	2.60	0.13	0.50	1.56					
Е	0.22	2.50	0.22	0.75	1.90					

Tabla 6-7. Parámetros espectrales propuestos.



Figura 6-2. Formas espectrales propuestas. PGA obtenido con la ley de atenuación propuesta por Montalva et al. (2017).

## 6.3 Comparaciones con otras formas espectrales

La ecuación de predicción del movimiento de suelo (GMPE, del inglés "*Ground-motion prediction equation*") propuesta por Montalva et al. (2017) es utilizada para predecir la respuesta espectral para cada tipo de suelo y compararla con los espectros propuestos en este trabajo. La base de datos utilizada por Montalva et al. (2017) contiene 3774 registros

de 473 terremotos, incluyendo los últimos mega terremotos ocurridos en el país: Maule 2010 ( $M_w$  8.8), Iquique 2014 ( $M_w$  8.1) e Illapel 2015 ( $M_w$  8.3). El modelo utiliza la forma funcional propuesta por Abrahamson et al. (2016). Esta forma tiene ventajas sobre otras debido a que usa el valor de  $V_{s30}$  como parámetro de caracterización e incluye la respuesta no lineal del sitio.

Montalva et al. (2017) proporcionan material electrónico entre el cual se encuentra la implementación en MATLAB de la GMPE. La función requiere como parámetros de entrada la distancia a la ruptura (*R*), magnitud momento ( $M_w$ ), tipo de terremoto (interplaca o intraplaca), profundidad hipocentral ( $Z_h$ ),  $V_{s30}$  y el número de desviaciones estándar de la mediana ( $\epsilon$ ). Los parámetros necesarios para implementar la GMPE son obtenidos de la base de datos de Bastías y Montalva (2016) considerando los datos del terremoto del Maule de 2010 captado por la estación LACH ubicada en Santiago (i.e.  $M_w$  = 8.8, interplaca, R = 65 km,  $Z_h = 30$  km). No se considera desviación estándar  $\epsilon = 0$ . Se obtienen espectros de respuesta de pseudo-aceleración para los distintos tipos de suelo variando el valor de  $V_{s30}$ . Se consideran valores de 1200 m/s, 700 m/s, 425 m/s, 265 m/s y 125 m/s para los Suelos Tipo A, B, C, D y E, respectivamente.

Las Figuras 6-3, 6-4, 6-5, 6-6 y 6-7 muestran la comparación entre el espectro propuesto en este estudio y el espectro obtenido mediante la GMPE para Suelos Tipo A, B, C, D y E, respectivamente. Se observa en general una gran similitud entre los espectros. Para suelos rígidos (i.e. Suelos Tipo A y B) se proponen factores de amplificación  $\alpha_A$  mayores a los obtenidos con la GMPE propuesta por Montalva et al. (2017) y para los suelos menos rígidos (i.e. Suelos Tipo D y E) se proponen valores de  $\alpha_A$  menores a los obtenidos por Montalva et al. (2017).



Figura 6-3. Comparación de la forma espectral propuesta con el espectro de Montalva et al. (2017) para un Suelo Tipo A (R = 65 km,  $M_w = 8.8$ , interplaca,  $Z_h = 390$  km,  $V_{s30} = 1200$  m/s,  $\epsilon = 0$ ).



Figura 6-4. Comparación de la forma espectral propuesta con el espectro de Montalva et al. (2017) para un Suelo Tipo B (R = 65 km,  $M_w = 8.8$ , interplaca,  $Z_h = 390$  km,  $V_{s30} = 700$  m/s,  $\epsilon = 0$ ).



Figura 6-5. Comparación de la forma espectral propuesta con el espectro de Montalva et al. (2017) para un Suelo Tipo C (R = 65 km,  $M_w = 8.8$ , interplaca,  $Z_h = 390$  km,  $V_{s30} = 425$  m/s,  $\epsilon = 0$ ).



Figura 6-6. Comparación de la forma espectral propuesta con el espectro de Montalva et al. (2017) para un Suelo Tipo D (R = 65 km,  $M_w = 8.8$ , interplaca,  $Z_h = 390$  km,  $V_{s30} = 265$  m/s,  $\epsilon = 0$ ).



Figura 6-7. Comparación de la forma espectral propuesta con el espectro de Montalva et al. (2017) para un Suelo Tipo E (R = 65 km,  $M_w = 8.8$ , interplaca,  $Z_h = 390$  km,  $V_{s30} = 125$  m/s,  $\epsilon = 0$ ).

#### 7 CONCLUSIONES

En este estudio se determinaron valores de parámetros espectrales que definen la forma del espectro de diseño de Newmark-Hall de registros sísmicos obtenidos en Chile en sitios en donde el valor del parámetro  $V_{s30}$  ha sido medido. Los registros fueron agrupados según el tipo de suelo indicado tanto en la Clasificación Actual de las normas chilenas de diseño sísmico para edificios habitacionales y de oficinas como en la nueva Clasificación propuesta por la SOCHIGE. Se consideraron los registros obtenidos en todo Chile y también registros obtenidos sólo de la zona central de Chile. Se consideró la posible influencia de la direccionalidad de los registros. Finalmente, se analizaron las relaciones entre los parámetros espectrales de Newmark-Hall y los parámetros de caracterización del suelo. Del análisis de los resultados y de la comparación entre espectros normalizados se concluye que:

- La influencia de la direccionalidad de los registros no es relevante al agrupar los registros de la base de datos considerada según los distintos casos de estudio analizados en este trabajo. Esta observación es hasta cierto punto esperable debido a que los registros sísmicos considerados en estudio no presentan efectos de campo cercano. No se descarta considerar la direccionalidad para futuras investigaciones con registros y grupos distintos a los establecidos en este trabajo.
- Los valores de  $\alpha_A$  disminuyen a medida que aumenta la flexibilidad del suelo, lo cual discrepa con los espectros de diseño de la norma NCh2745. Tendencia idéntica a lo que establece ASCE7.
- Los valores de  $T_d$  resultan ser relativamente pequeños tal como en NCh2745. Se recomienda que las importantes discrepancias de los valores de  $T_d$  encontrados con los indicados en ASCE 7 sean estudiadas en profundidad en investigaciones futuras.
- En la zona de periodos medios y largos la forma espectral es independiente de los distintos factores considerados en este trabajo. Esta observación es muy posiblemente una consecuencia del criterio de normalización de registros adoptado

(i.e. mismo valor de PGV) debido a que dicho criterio reduce significativamente la dispersión de ordenadas espectrales en la zona de periodos medios y largos.

- En la zona de periodos cortos la forma espectral sí depende de la zona considerada y en menor medida del criterio de clasificación de suelos. Esta observación también es muy posiblemente una consecuencia del criterio de normalización adoptado, el cual no reduce la dispersión de ordenadas espectrales en la zona de periodos cortos.
- En la zona de periodos altos de los espectros que se obtienen del análisis de los registros no se observa en ningún caso un aumento monotónico del valor de ordenadas espectrales a medida que aumenta la flexibilidad del suelo.
- En general, el periodo predominante  $T_0$  parece ser mejor parámetro de caracterización de suelo que la velocidad de onda de corte  $V_{s30}$  debido a que se correlaciona de mejor manera con los parámetros que definen el espectro de diseño. Sin embargo, se concluye que ningún parámetro, por sí solo, es adecuado para caracterizar el suelo de fundación.
- En base a los valores obtenidos del análisis de los registros se proponen valores de parámetros espectrales de Newmark-Hall que resultan en espectros que exhiben las relaciones conocidas entre forma espectral y tipo de suelo en todo el rango de periodos de interés ingenieril. Los espectros propuestos resultaron ser muy similares a los espectros que se obtienen considerando un escenario típico en Chile y una ley de atenuación muy reciente. Los espectros propuestos podrían convertirse en un primer paso racional para la unificación de los espectros de diseño de las normas sísmicas chilenas.

#### **BIBLIOGRAFIA**

Abrahamson N, Gregor N, Addo K (2016): BC Hydro Ground Motion Prediction Equations For Subduction Earthquakes. *Earthquake Spectra*, **32** (1), 23-44.

ASCE (2011). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures ASCE/SEI* 7-10. American Society of Civil Engineers, Reston, EE.UU.

Bastías N, Montalva GA (2016): Chile strong ground motion flatfile. *Earthquake Spectra*, **32** (4), 2549-2566.

Boore DM, Watson-Lamprey J, Abrahamson NA (2006): Orientation-independent measures of ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96** (4), 1502-1511.

CEN (2004): *Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance*. European Committee for Standardization, Bruselas, Bélgica.

Chopra AK (2012): Dynamics of Structures - Theory and Applications to Earthquake Engineering. Pearson, Upper Sanddle River, EE.UU. (4<sup>a</sup> Edición)

CSN (2017): Centro Sismológico Nacional, Universidad de Chile en <u>http://www.sismologia.cl</u> (último acceso: mayo de 2018), Santiago, Chile.

COSMOS (2017): Virtual Data Center at <u>www.strongmotioncenter.org/vdc</u> (último acceso: mayo de 2018). Consortium of Strong Motion Observation Systems, San Francisco, EE.UU.

FEMA (2009): *Quantification of Building Seismic Performance Factors FEMA P695*. Federal Emergency Management Agency, Washington DC, EE.UU..

INN (2003): Norma Chilena NCh2369 Of.2003 Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.

INN (2009): Norma Chilena NCh433 Of.1996 Mod.2009 Diseño Sísmico de Edificios. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.

INN (2013): Norma Chilena NCh2745 Of.2013 Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.

INN (2017): Norma Chilena NCh3411 Of.2017 Diseño sísmico de edificios con sistemas pasivos de disipación de energía - Requisitos y métodos de ensayo. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.

MINVU (2011): *Decreto Supremo*  $N^{\circ}$  61/2011. Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Santiago, Chile.

Montalva GA, Bastías N, Rodríguez-Marek A (2017): Ground-Motion Prediction Equation for the Chilean Subduction Zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **107** (2), 901-911.

Nakamura (1989): A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, **30**(1), 25-33.

Newmark NM, Hall WJ (1982): Earthquake Spectra and Design. *Monograph MNO-3*, Earthquake Engineering Research Center, Oakland, EE.UU.

RENADIC (2017): Registros de Terremotos Convenio Universidad de Chile – ONEMI en <u>http://terremotos.ing.uchile.cl</u> (último acceso: mayo de 2018). Red de Cobertura Nacional de Acelerógrafos, Santiago, Chile.

Rivera G (2015). Determinación de Parámetros Espectrales de Registros Sísmicos Chilenos en Función de Propiedades Características del Suelo. *Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería*, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

ANEXOS

Registro compone	o y ente	Evento	Estación	PGA [g]	PGV [cm/s2]	FNi
20002	NS	50001	RANC01S	0.25	10.26	1.21
20002	EO	50001	RANC01S	0.14	6.96	1.21
20003	NS	50001	RANC02S	0.29	24.29	0.42
20003	EO	50001	RANC02S	0.34	24.62	0.42
20004	NS	50001	RANC03S	0.25	11.59	0.82
20004	EO	50001	RANC03S	0.19	13.38	0.82
20005	NS	50001	SERE02R	0.09	3.95	2.27
20005	EO	50001	SERE02R	0.12	5.09	2.27
20007	NS	50001	STGO01S	0.68	36.72	0.27
20007	EO	50001	STGO01S	0.52	40.17	0.27
20008	NS	50001	STGO03S	0.12	12.12	0.77
20008	EO	50001	STGO03S	0.12	14.28	0.77
20009	NS	50001	MAUL03R	0.17	11.81	1.00
20009	EO	50001	MAUL03R	0.17	8.79	1.00
20010	NS	50001	MAUL02S	0.08	6.48	1.36
20010	EO	50001	MAUL02S	0.12	8.62	1.36
20012	NS	50001	MAUL04S	0.14	17.82	0.86
20012	EO	50001	MAUL04S	0.08	7.96	0.86
20013	NS	50001	MAUL05S	0.18	11.11	0.93
20013	EO	50001	MAUL05S	0.14	10.88	0.93
20014	NS	50001	MAUL06S	0.22	9.52	0.85
20014	EO	50001	MAUL06S	0.29	14.94	0.85
20015	NS	50001	VALP01S	0.17	7.50	1.33
20015	EO	50001	VALP01S	0.13	7.84	1.33
20016	NS	50001	VALP02S	0.30	11.44	0.81
20016	EO	50001	VALP02S	0.31	13.67	0.81
20017	NS	50001	VALP08R	0.43	23.33	0.33
20017	EO	50001	VALP08R	0.74	41.49	0.33
20018	NS	50001	VALP04S	0.47	36.77	0.27
20018	EO	50001	VALP04S	0.36	39.76	0.27
20019	NS	50001	VALP05S	0.26	12.17	0.66

# ANEXO A: LISTA DE REGISTROS DE LA BASE DE DATOS. INFORMACIÓN OBTENIDA DE BASTÍAS Y MONTALVA (2016).

Registr compon	o y ente	Evento	Estación	PGA [g]	PGV [cm/s2]	FNi
20019	EO	50001	VALP05S	0.28	19.57	0.66
20020	NS	50001	VALP07R	0.18	13.68	1.07
20020	EO	50001	VALP07R	0.17	6.57	1.07
20021	NS	50001	VALP07S	0.22	26.58	0.34
20021	EO	50001	VALP07S	0.36	32.82	0.34
20022	NS	50001	VALP10S	0.48	17.97	0.60
20022	EO	50001	VALP10S	0.33	16.25	0.60
20023	NS	50001	VALP11S	0.72	42.69	0.24
20023	EO	50001	VALP11S	0.71	42.74	0.24
20024	NS	50001	VALP01R	0.23	6.13	1.18
20024	EO	50001	VALP01R	0.23	12.12	1.18
20025	NS	50001	VALP13S	0.22	22.92	0.42
20025	EO	50001	VALP13S	0.23	25.08	0.42
20026	NS	50001	VALP06R	0.29	29.39	0.46
20026	EO	50001	VALP06R	0.16	16.61	0.46
20027	NS	50002	RANC01S	0.05	5.50	1.47
20027	EO	50002	RANC01S	0.12	8.78	1.47
20033	NS	50002	MAUL06S	0.16	9.07	1.14
20033	EO	50002	MAUL06S	0.12	8.77	1.14
20038	NS	50004	VALP08R	0.13	4.51	1.97
20038	EO	50004	VALP08R	0.22	5.95	1.97
20039	NS	50008	SERE02R	0.24	4.52	1.84
20039	EO	50008	SERE02R	0.24	6.75	1.84
20042	NS	50020	ARIC02R	0.22	18.38	0.54
20042	EO	50020	ARIC02R	0.27	19.20	0.54
20043	NS	50020	ARIC03R	0.27	20.72	0.39
20043	EO	50020	ARIC03R	0.33	32.36	0.39
20044	NS	50020	ARIC04R	0.34	25.22	0.41
20044	EO	50020	ARIC04R	0.28	24.65	0.41
20045	NS	50020	ARIC06R	0.25	29.57	0.35
20045	EO	50020	ARIC06R	0.26	29.10	0.35
20046	NS	50020	ARIC08R	0.21	12.62	0.88
20046	EO	50020	ARIC08R	0.20	10.57	0.88

Registro y		Evento	Estación	PGA [g]	PGV	FNi
20047	NS	50020	ARIC09R	0.14	8.32	1.16
20047	EO	50020	ARIC09R	0.16	9.31	1.16
20050	NS	50023	VALP04R	0.20	7.56	1.68
20050	EO	50023	VALP04R	0.12	4.84	1.68
20053	NS	50030	SERE03R	0.09	3.62	2.86
20053	EO	50030	SERE03R	0.11	3.52	2.86
20054	NS	50030	SERE01R	0.15	5.16	1.71
20054	EO	50030	SERE01R	0.13	6.91	1.71
20060	NS	50048	VALP04R	0.10	3.50	4.80
20060	EO	50048	VALP04R	0.04	1.29	4.80
20062	NS	50050	TARA05R	0.11	4.12	2.34
20062	EO	50050	TARA05R	0.10	4.62	2.34
20065	NS	50053	VALP03R	0.12	2.88	4.54
20065	EO	50053	VALP03R	0.10	1.75	4.54
20066	NS	50053	VALP04R	0.13	4.69	2.39
20066	EO	50053	VALP04R	0.12	3.86	2.39
20067	NS	50054	SERE03R	0.11	4.05	1.89
20067	EO	50054	SERE03R	0.14	7.18	1.89
20073	NS	50062	ANTO03R	0.57	20.89	0.48
20073	EO	50062	ANTO03R	0.78	21.53	0.48
20074	NS	50062	ANTO04R	0.38	17.97	0.68
20074	EO	50062	ANTO04R	0.41	12.63	0.68
20075	NS	50062	ANTO06R	0.42	37.23	0.30
20075	EO	50062	ANTO06R	0.39	31.55	0.30
20076	NS	50062	ANTO09R	0.10	8.12	0.94
20076	EO	50062	ANTO09R	0.13	14.44	0.94
20082	NS	50062	TARA05R	0.18	7.50	1.37
20082	EO	50062	TARA05R	0.20	7.34	1.37
20084	NS	50062	TARA07R	0.11	7.31	1.83
20084	EO	50062	TARA07R	0.08	4.22	1.83
20086	NS	50062	TARA11R	0.30	8.33	1.17
20086	EO	50062	TARA11R	0.36	9.09	1.17
20088	NS	50064	ANTO06R	0.08	7.00	1.07

Registr compon	o y ente	Evento	Estación	PGA [g]	PGV [cm/s2]	FNi
20088	EO	50064	ANTO06R	0.12	12.93	1.07
20092	NS	50068	VALP03R	0.11	3.54	2.63
20092	EO	50068	VALP03R	0.11	4.24	2.63
20093	NS	50068	VALP06R	0.06	2.36	2.54
20093	EO	50068	VALP06R	0.11	6.80	2.54
20095	NS	50069	ANTO05R	0.18	5.26	1.73
20095	EO	50069	ANTO05R	0.17	6.60	1.73
20096	NS	50069	ANTO06R	0.07	7.79	0.96
20096	EO	50069	ANTO06R	0.13	14.50	0.96
20097	NS	50069	ANTO07R	0.48	17.97	0.42
20097	EO	50069	ANTO07R	0.40	32.33	0.42
20098	NS	50069	ANTO08R	0.10	8.14	0.80
20098	EO	50069	ANTO08R	0.18	19.71	0.80
20100	NS	50070	TARA04R	0.10	1.82	6.78
20100	EO	50070	TARA04R	0.07	1.24	6.78
20102	NS	50070	TARA07R	0.12	2.55	3.92
20102	EO	50070	TARA07R	0.18	2.64	3.92
20103	NS	50071	TARA04R	0.28	11.49	1.21
20103	EO	50071	TARA04R	0.22	6.20	1.21
20106	NS	50071	TARA07R	0.25	9.05	1.03
20106	EO	50071	TARA07R	0.14	10.79	1.03
20107	NS	50072	TARA04R	0.14	7.50	1.91
20107	EO	50072	TARA04R	0.08	3.79	1.91
20110	NS	50072	TARA07R	0.11	5.59	1.67
20110	EO	50072	TARA07R	0.10	6.63	1.67
20115	NS	50084	ARIC09R	0.13	4.50	2.40
20115	EO	50084	ARIC09R	0.14	4.00	2.40
20116	NS	50084	TARA02R	0.16	2.88	3.41
20116	EO	50084	TARA02R	0.13	3.10	3.41
20119	NS	50084	TARA12R	0.12	3.48	3.00
20119	EO	50084	TARA12R	0.12	3.32	3.00
20120	NS	50085	COPI02R	0.14	5.05	2.62
20120	EO	50085	COPI02R	0.07	2.99	2.62

Registr compon	o y ente	Evento	Estación	PGA [g]	PGV [cm/s2]	FNi
20121	NS	50087	ANGO01R	0.93	34.31	0.28
20121	EO	50087	ANGO01R	0.69	37.65	0.28
20122	NS	50087	CONC01R	0.40	69.28	0.17
20122	EO	50087	CONC01R	0.29	52.58	0.17
20125	NS	50087	MATA01R	0.34	43.55	0.29
20125	EO	50087	MATA01R	0.31	27.59	0.29
20126	NS	50087	STGO01R	0.22	21.92	0.43
20126	EO	50087	STGO01R	0.31	25.65	0.43
20127	NS	50087	STGO02R	0.56	44.31	0.25
20127	EO	50087	STGO02R	0.48	38.97	0.25
20128	NS	50087	STGO03R	0.30	29.27	0.39
20128	EO	50087	STGO03R	0.29	22.78	0.39
20129	NS	50087	STGO04R	0.19	15.32	0.69
20129	EO	50087	STGO04R	0.13	14.23	0.69
20130	NS	50087	STGO05R	0.26	24.57	0.37
20130	EO	50087	STGO05R	0.26	31.40	0.37
20131	NS	50087	MAUL01R	0.47	27.76	0.34
20131	EO	50087	MAUL01R	0.41	32.68	0.34
20132	NS	50087	MAUL02R	0.41	38.65	0.28
20132	EO	50087	MAUL02R	0.50	34.94	0.28
20133	NS	50087	MAUL03R	0.49	27.75	0.33
20133	EO	50087	MAUL03R	0.42	33.40	0.33
20134	NS	50087	MAUL04R	0.56	43.17	0.19
20134	EO	50087	MAUL04R	0.64	68.18	0.19
20135	NS	50087	LAGO01R	0.09	13.88	0.64
20135	EO	50087	LAGO01R	0.14	18.40	0.64
20136	NS	50087	VALP01R	0.30	16.15	0.51
20136	EO	50087	VALP01R	0.42	24.63	0.51
20137	NS	50087	VALP02R	0.22	20.97	0.39
20137	EO	50087	VALP02R	0.33	32.66	0.39
20138	NS	50087	VALP03R	0.35	37.92	0.25
20138	EO	50087	VALP03R	0.34	44.60	0.25
20139	NS	50087	VALP06R	0.22	28.96	0.40

Registr compon	o y ente	Evento	Estación	PGA [g]	PGV [cm/s2]	FNi
20139	EO	50087	VALP06R	0.27	22.23	0.40
20140	NS	50087	VALP07R	0.15	7.76	0.91
20140	EO	50087	VALP07R	0.32	16.25	0.91
20141	NS	50087	VALP08R	0.35	26.08	0.36
20141	EO	50087	VALP08R	0.59	30.81	0.36
20142	NS	50087	CCSP	0.65	36.81	0.25
20142	EO	50087	CCSP	0.61	43.92	0.25
20143	NS	50087	MELP	0.56	22.65	0.31
20143	EO	50087	MELP	0.77	47.25	0.31
20144	NS	50087	CLCH	0.21	29.61	0.35
20144	EO	50087	CLCH	0.23	28.54	0.35
20145	NS	50087	SJCH	0.47	50.43	0.25
20145	EO	50087	SJCH	0.48	32.83	0.25
20146	NS	50087	STL	0.24	29.52	0.29
20146	EO	50087	STL	0.34	41.07	0.29
20147	NS	50087	ANTU	0.23	24.54	0.42
20147	EO	50087	ANTU	0.27	24.12	0.42
20148	NS	50087	LACH	0.31	31.62	0.36
20148	EO	50087	LACH	0.23	25.72	0.36
20149	NS	50087	ROC1	0.19	20.77	0.51
20149	EO	50087	ROC1	0.13	19.32	0.51
20150	NS	50087	CSCH	0.29	28.54	0.37
20150	EO	50087	CSCH	0.33	26.54	0.37
20151	NS	50087	OLMU	0.35	27.45	0.40
20151	EO	50087	OLMU	0.25	23.20	0.40
20153	NS	50089	MAUL01R	0.18	6.75	1.30
20153	EO	50089	MAUL01R	0.15	9.06	1.30
20157	NS	50091	G001	0.35	11.42	1.04
20157	EO	50091	GO01	0.24	8.38	1.04
20158	NS	50091	НМВСХ	0.26	20.73	0.49
20158	EO	50091	НМВСХ	0.24	21.12	0.49
20159	NS	50091	MNMCX	0.40	16.05	0.64
20159	EO	50091	MNMCX	0.27	15.94	0.64

Registro y componente		Evento	Estación	PGA [g]	PGV [cm/s2]	FNi
20160	NS	50091	PB01	0.10	8.48	1.24
20160	EO	50091	PB01	0.10	7.99	1.24
20161	NS	50091	PB02	0.09	7.53	1.19
20161	EO	50091	PB02	0.17	9.67	1.19
20170	NS	50091	PB11	0.73	26.41	0.36
20170	EO	50091	PB11	0.49	29.87	0.36
20171	NS	50091	PB12	0.10	5.72	1.58
20171	EO	50091	PB12	0.11	7.22	1.58
20174	NS	50091	PSGCX	0.20	11.71	0.84
20174	EO	50091	PSGCX	0.18	12.67	0.84
20175	NS	50091	T03A	0.60	19.82	0.40
20175	EO	50091	T03A	0.57	33.49	0.40
20176	NS	50091	T05A	0.27	20.62	0.50
20176	EO	50091	T05A	0.31	20.17	0.50
20177	NS	50091	T06A	0.22	14.82	0.57
20177	EO	50091	T06A	0.27	21.31	0.57
20178	NS	50091	T13A	0.34	16.43	0.60
20178	EO	50091	T13A	0.27	17.73	0.60
20179	NS	50091	TA01	0.19	8.94	0.99
20179	EO	50091	TA01	0.17	11.80	0.99
20180	NS	50092	PB01	0.17	15.15	0.73
20180	EO	50092	PB01	0.16	12.72	0.73
20181	NS	50092	PB02	0.08	5.24	1.59
20181	EO	50092	PB02	0.14	7.81	1.59
20187	NS	50092	PB11	0.21	19.39	0.61
20187	EO	50092	PB11	0.21	14.25	0.61
20190	NS	50091	T09A	0.57	13.16	0.67
20190	EO	50091	T09A	0.41	17.70	0.67
20191	NS	50091	T08A	0.39	18.68	0.40
20191	EO	50091	T08A	0.45	34.88	0.40
20192	NS	50091	T10A	0.78	45.27	0.24
20192	EO	50091	T10A	0.65	39.04	0.24
20193	NS	50091	T07A	0.61	34.34	0.28

Registro y componente		Evento	Estación	PGA [g]	PGV [cm/s2]	FNi
20193	EO	50091	T07A	0.52	39.52	0.28
20194	NS	50091	AP01	0.10	11.53	0.79
20194	EO	50091	AP01	0.17	14.42	0.79
20356	NS	50116	T09A	0.12	1.33	8.86
20356	EO	50116	T09A	0.08	1.00	8.86
20390	NS	50122	T09A	0.11	0.68	15.98
20390	EO	50122	T09A	0.07	0.59	15.98
20394	NS	50124	T03A	0.08	3.05	2.86
20394	EO	50124	T03A	0.11	4.15	2.86
20573	NS	50182	T02A	0.11	2.01	5.02
20573	EO	50182	T02A	0.08	2.05	5.02
20631	NS	50188	T01A	0.26	8.86	1.03
20631	EO	50188	T01A	0.28	11.10	1.03
20632	NS	50188	T02A	0.17	6.92	1.65
20632	EO	50188	T02A	0.09	5.52	1.65
20633	NS	50188	T03A	0.20	6.55	1.93
20633	EO	50188	T03A	0.11	4.26	1.93
20638	NS	50188	T08A	0.13	5.69	1.94
20638	EO	50188	T08A	0.14	4.84	1.94
20644	NS	50188	TA02	0.40	10.27	1.22
20644	EO	50188	TA02	0.21	6.77	1.22
20653	NS	50193	R07M	0.10	6.28	1.64
20653	EO	50193	R07M	0.08	6.15	1.64
20655	NS	50193	R13M	0.12	8.00	1.33
20655	EO	50193	R13M	0.13	7.30	1.33
20665	NS	50354	GO03	0.34	15.48	1.03
20665	EO	50354	GO03	0.21	6.34	1.03
20694	NS	50092	GO01	0.20	12.24	0.84
20694	EO	50092	GO01	0.25	12.03	0.84
20695	NS	50092	НМВСХ	0.23	8.41	0.78
20695	EO	50092	HMBCX	0.26	20.13	0.78
20696	NS	50092	MNMCX	0.13	6.70	1.21
20696	EO	50092	MNMCX	0.19	10.65	1.21

Registro y componente		Evento	Estación	PGA [g]	PGV [cm/s2]	FNi
20697	NS	50092	PSGCX	0.10	7.08	1.31
20697	EO	50092	PSGCX	0.11	8.55	1.31
20698	NS	50092	T03A	0.23	11.15	0.87
20698	EO	50092	T03A	0.29	12.33	0.87
20699	NS	50092	T05A	0.18	11.50	0.88
20699	EO	50092	T05A	0.19	11.78	0.88
20700	NS	50092	T06A	0.14	10.31	1.00
20700	EO	50092	T06A	0.21	10.04	1.00
20701	NS	50092	T09A	0.17	7.36	1.37
20701	EO	50092	T09A	0.19	7.55	1.37
20702	NS	50092	T10A	0.58	39.34	0.27
20702	EO	50092	T10A	0.59	35.22	0.27
20703	NS	50092	T13A	0.37	21.02	0.40
20703	EO	50092	T13A	0.38	30.20	0.40
20704	NS	50092	TA01	0.11	5.54	1.28
20704	EO	50092	TA01	0.14	11.50	1.28
20705	NS	50459	T01A	0.19	4.67	2.18
20705	EO	50459	T01A	0.27	4.67	2.18
20706	NS	50459	T02A	0.27	7.06	0.96
20706	EO	50459	T02A	0.33	15.98	0.96
20707	NS	50459	T03A	0.16	4.65	1.64
20707	EO	50459	T03A	0.19	8.26	1.64
20708	NS	50459	T04A	0.29	6.59	0.91
20708	EO	50459	T04A	0.47	18.88	0.91
20709	NS	50459	T05A	0.14	3.66	3.44
20709	EO	50459	T05A	0.09	2.40	3.44
20710	NS	50459	T06A	0.11	2.05	3.18
20710	EO	50459	T06A	0.11	5.00	3.18
20712	NS	50459	T08A	0.11	2.06	3.83
20712	EO	50459	T08A	0.11	3.44	3.83
20720	NS	50301	GO05	0.11	5.30	1.22
20720	EO	50301	GO05	0.19	13.23	1.22
20727	NS	50009	ARIC08R	0.08	4.28	2.15

Registr	0 y ente	Evento	Estación	PGA [g]	PGV [cm/s2]	FNi
20727	EO	50009	ARIC08R	0.11	5.24	2.15
20729	NS	50005	SERE02R	0.31	11.11	0.76
20729	EO	50005	SERE02R	0.39	16.17	0.76
20731	NS	50005	VALP01R	0.09	5.41	1.69
20731	EO	50005	VALP01R	0.15	6.69	1.69
20734	NS	50014	STGO04R	0.10	2.51	2.83
20734	EO	50014	STGO04R	0.11	5.16	2.83
20751	NS	50041	TARA05R	0.10	2.83	3.38
20751	EO	50041	TARA05R	0.11	3.21	3.38
20754	NS	50047	ARIC03R	0.19	11.11	0.85
20754	EO	50047	ARIC03R	0.17	12.88	0.85
20755	NS	50047	ARIC04R	0.16	13.18	0.66
20755	EO	50047	ARIC04R	0.17	18.17	0.66
20756	NS	50047	ARIC05R	0.21	7.64	1.25
20756	EO	50047	ARIC05R	0.17	8.67	1.25
20757	NS	50047	ARIC07R	0.39	16.26	0.68
20757	EO	50047	ARIC07R	0.32	14.00	0.68
20758	NS	50047	ARIC08R	0.09	5.89	1.55
20758	EO	50047	ARIC08R	0.10	7.37	1.55
20759	NS	50047	ARIC09R	0.44	18.51	0.55
20759	EO	50047	ARIC09R	0.45	18.42	0.55
20760	NS	50047	TARA01R	0.37	14.25	0.60
20760	EO	50047	TARA01R	0.79	20.17	0.60
20761	NS	50047	TARA05R	0.57	26.37	0.33
20761	EO	50047	TARA05R	0.72	36.40	0.33
20762	NS	50047	TARA06R	0.23	10.89	0.75
20762	EO	50047	TARA06R	0.25	17.14	0.75
20763	NS	50047	TARA08R	0.26	16.17	0.59
20763	EO	50047	TARA08R	0.27	18.68	0.59
20764	NS	50047	TARA09R	0.22	17.67	0.62
20764	EO	50047	TARA09R	0.20	15.34	0.62
20765	NS	50047	TARA11R	0.12	7.96	1.35
20765	EO	50047	TARA11R	0.11	7.11	1.35
Registro y		Evento	Estación	PGA [g]	PGV [cm/s2]	FNi
------------	----	--------	----------	---------	----------------	------
20774	NS	50046	ARIC02R	0.09	3.47	1.98
20774	EO	50046	ARIC02R	0.16	7.60	1.98
20782	NS	50073	TARA05R	0.25	6.69	1.63
20782	EO	50073	TARA05R	0.29	5.85	1.63
20811	NS	50179	PB02	0.06	1.06	6.68
20811	EO	50179	PB02	0.12	2.19	6.68
20827	NS	50180	PB02	0.08	1.34	7.44
20827	EO	50180	PB02	0.10	1.40	7.44
20901	NS	50341	LSCH	0.11	4.09	2.46
20901	EO	50341	LSCH	0.07	4.18	2.46
20964	NS	50460	T13A	0.09	3.47	2.22
20964	EO	50460	T13A	0.10	6.05	2.22
20989	NS	50087	EN01CV	0.19	26.23	0.40
20989	EO	50087	EN01CV	0.15	24.62	0.40
20990	NS	50087	EN02RA	0.20	18.75	0.43
20990	EO	50087	EN02RA	0.20	30.56	0.43
20991	NS	50087	EN03TO	0.17	18.79	0.46
20991	EO	50087	EN03TO	0.17	26.48	0.46
20992	NS	50087	EN04ME	0.14	13.19	0.65
20992	EO	50087	EN04ME	0.14	18.39	0.65
70981	NS	50234	CCSP	0.10	4.47	1.86
70981	EO	50234	CCSP	0.14	6.70	1.86
72175	NS	50497	TA01	0.11	4.91	2.59
72175	EO	50497	TA01	0.09	3.15	2.59
72177	NS	50498	GO01	0.25	12.07	0.84
72177	EO	50498	GO01	0.21	12.27	0.84
72178	NS	50498	НМВСХ	0.25	20.10	0.78
72178	EO	50498	НМВСХ	0.23	8.43	0.78
72179	NS	50498	MNMCX	0.18	10.70	1.20
72179	EO	50498	MNMCX	0.13	6.70	1.20
72180	NS	50498	PB01	0.16	12.77	0.73
72180	EO	50498	PB01	0.17	15.19	0.73
72181	NS	50498	PB02	0.14	7.87	1.59

Registro y componente		Evento	Estación	PGA [g]	PGV [cm/s2]	FNi
72181	EO	50498	PB02	0.08	5.24	1.59
72190	NS	50498	PB11	0.21	14.24	0.61
72190	EO	50498	PB11	0.21	19.40	0.61
72194	NS	50498	PSGCX	0.11	8.54	1.31
72194	EO	50498	PSGCX	0.11	7.10	1.31
72195	NS	50498	TA01	0.13	11.52	1.27
72195	EO	50498	TA01	0.11	5.55	1.27
72479	NS	50525	VA03	0.10	2.16	7.75
72479	EO	50525	VA03	0.05	0.80	7.75
90013	NS	50670	GO04	0.34	38.12	0.29
90013	EO	50670	GO04	0.24	31.81	0.29
90019	NS	50670	CO03	0.29	13.20	0.71
90019	EO	50670	CO03	0.35	15.71	0.71
90024	NS	50670	VA03	0.09	4.75	1.99
90024	EO	50670	VA03	0.14	5.53	1.99
90026	NS	50671	GO04	0.11	10.26	0.76
90026	EO	50671	GO04	0.16	17.37	0.76
90034	NS	50671	VA03	0.08	6.75	1.82
90034	EO	50671	VA03	0.13	4.64	1.82
90036	NS	50672	GO04	0.11	10.29	0.76
90036	EO	50672	GO04	0.16	17.37	0.76
90044	NS	50672	VA03	0.08	6.75	1.83
90044	EO	50672	VA03	0.13	4.61	1.83
90063	NS	50670	C110	0.71	32.10	0.29
90063	EO	50670	C110	0.83	38.34	0.29
90064	NS	50670	V02A	0.14	3.63	2.55
90064	EO	50670	V02A	0.09	4.41	2.55
90066	NS	50670	C010	0.18	9.63	1.00
90066	EO	50670	C010	0.15	10.74	1.00
90068	NS	50670	C09O	0.19	5.83	1.49
90068	EO	50670	C09O	0.19	7.99	1.49
90075	NS	50672	C110	0.23	7.66	1.34
90075	EO	50672	C110	0.18	7.59	1.34

Registro y		Evento	Estación	PGA [g]	PGV [cm/s2]	FNi
90076	NS	50672	V02A	0.11	2.33	3.79
90076	EO	50672	V02A	0.09	3.10	3.79
90098	NS	50682	CO03	0.16	3.72	2.69
90098	EO	50682	CO03	0.14	3.84	2.69
90103	NS	50684	G004	0.11	7.48	1.55
90103	EO	50684	G004	0.12	5.80	1.55
90104	NS	50684	CO02	0.20	6.49	1.66
90104	EO	50684	CO02	0.10	5.80	1.66
90105	NS	50684	CO03	0.15	5.28	1.44
90105	EO	50684	CO03	0.22	9.46	1.44
91000	NS	50694	V02A	0.34	6.68	1.11
91000	EO	50694	V02A	0.37	12.57	1.11
91001	NS	50694	R12M	0.13	8.79	1.29
91001	EO	50694	R12M	0.11	7.12	1.29
91002	NS	50694	R13M	0.09	7.32	1.63
91002	EO	50694	R13M	0.07	5.31	1.63
91003	NS	50694	R18M	0.10	7.85	1.56
91003	EO	50694	R18M	0.08	5.40	1.56
91004	NS	50698	V02A	0.11	2.00	4.96
91004	EO	50698	V02A	0.11	2.11	4.96
91005	NS	50700	V02A	0.14	3.09	2.80
91005	EO	50700	V02A	0.18	4.29	2.80
91006	NS	50701	V02A	0.09	1.80	6.66
91006	EO	50701	V02A	0.07	1.30	6.66

# ANEXO B: PROGRAMA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE ESPECTROS DE RESPUESTA DE DESPLAZAMIENTO Y PSEUDO-ACELERACIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).

```
close all
clear all
clc
of-_____
%CARGA DEL REGISTRO DE ACELERACIONES
% Archivo txt con las aceleraciones acomodadas en un solo vector.
% El primer valor del vector corresponde al paso de tiempo.
Registro=load('20148NS.txt');
UG=zeros(length(Registro),1);
UG(1, 1) = 0;
UG(2:end,1) = Registro(2:end,1);
DT=Registro(1,1); %paso de tiempo
VT=[0:DT:(length(Registro)-1)*DT]';
oʻc______
%Parámetros que definen los sistemas de 1 GDL considerados
xi=0.05; %Amortiquamiento típico de estructuras de hormigón (5%)
TN=[0:0.01:4]'; %periodo natural del sistema [seq]
%Vectores donde se almacenarán los valores de las ordenadas espectrales
D=zeros(length(TN),1);
A=zeros(length(TN),1);
9<u>.</u>_____
%Ciclo para resolver la ecuación del movimiento para distintos valores
de periodo Tn
for i=2:length(TN)
   Tn=TN(i,1); %Periodo natural
   Wn=2*pi/Tn; %Frecuencia circular natural
   display(Tn)
   %Condición para una mayor presición DT>Tn/20
   dt=DT;
   r=1;
   Est=Tn/20;
   while (dt>Est)
      r=r+1;
      dt=DT/r;
   end
```

```
127
```

```
vT=[0:dt:VT(end,1)]'; %Vector de tiempo con nuevo dt
   ug=interp1(VT,UG,vT); %Vector de aceleraciones con nuevo dt
   n=length(ug); %Número de puntos del registro de aceleraciones
   %Se resuelve la ecuación del movimiento mediante el método exacto.
   %Se llama a la función llamada MExacto
   %u=desplazamiento, du=velocidad, ddu=aceleración
   [u,du,ddu]=MExacto(ug,dt,n,Tn,xi);
   %Espectro de Desplazamiento
   D(i,1) = max(abs(u));
   %Espectro de pseudo-aceleración
   A(i,1)=D(i,1)*Wn^2/981; %[g]
End
A(1,1) = \max(abs(UG)/981);
06_____
%Gráficos
figure
plot(TN,A)
xlabel('Periodo [s]')
ylabel('Pseudo-aceleración [g]')
grid on
figure
plot(TN,D)
xlabel('Periodo [s]')
ylabel('Desplazamiento [cm]')
grid on
```

```
8-----
```

# **B.1** Función para resolver la ecuación del movimiento mediante la solución exacta.

```
function [ u,du,ddu ] = MExacto( UG,DT,N,Tn,xi )
%SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DEL MOVIMIENTO MEDIANTE EL MÉTODO 'EXACTO'
8
   Ésta función resuelve la ecuación del movimiento dado un registro
de
    aceleraciones, un periodo y amortiguamiento.
8
%1.- Cálculo de las Constantes
Wn=2*pi/Tn;
WD=Wn*(1-xi^2)^0.5;
%Coeficientes de las formulas de recurrencia
A=exp(-xi*Wn*DT)*(xi/((1-xi^2)^0.5)*sin(WD*DT)+cos(WD*DT));
B=exp(-xi*Wn*DT)/WD*sin(WD*DT);
C=1/Wn^2*(2*xi/Wn/DT+exp(-xi*Wn*DT)*(((1-2*xi^2)/WD/DT-xi/(1-
xi^2) ^0.5) *sin(WD*DT) - (1+2*xi/Wn/DT) *cos(WD*DT)));
D=1/Wn^2*(1-2*xi/Wn/DT+exp(-xi*Wn*DT)*((2*xi^2-
1) /WD/DT*sin(WD*DT) +2*xi/Wn/DT*cos(WD*DT)));
AA=-Wn*exp(-xi*Wn*DT)/(1-xi^2)^0.5*sin(WD*DT);
BB=exp(-xi*Wn*DT)*(cos(WD*DT)-xi/(1-xi^2)^0.5*sin(WD*DT));
CC=1/Wn^2*(-1/DT+exp(-xi*Wn*DT)*((Wn/(1-xi^2)^0.5+xi/((1-
xi^2)^0.5*DT))*sin(WD*DT)+1/DT*cos(WD*DT)));
DD=1/Wn^2/DT*(1-exp(-xi*Wn*DT)*(xi/(1-
xi^2) ^0.5*sin(WD*DT) +cos(WD*DT)));
%2.-Condiciones iniciales
u=zeros(N,1);
du=zeros(N,1);
ddu=zeros(N,1);
for i=2:N
    u(i,1) = A * u(i-1,1) + B * du(i-1,1) - C * UG(i-1,1) - D * UG(i,1);
    du(i,1) = AA*u(i-1,1) + BB*du(i-1,1) - CC*UG(i-1,1) - DD*UG(i,1);
    ddu(i,1)=-UG(i,1)-2*xi*Wn*du(i,1)-Wn^2*u(i,1);
end
end
```

# ANEXO C: PROGRAMA PARA AJUSTAR EL ESPECTRO DE DISEÑO DE NEWMARK-HALL A UN ESPECTRO DE RESPUESTA DE PSEUDO-ACELERACIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).

```
06_____
close all
clear all
clc
%Carga los espectros de respuesta de desplazamiento y de pseudo-
aceleración
D=load('D.txt');
Sa=load('A.txt');
%Periodo natural
Tn=[0:0.01:4]';
%Ajuste del espectro Newmark Hall al espectro de desplazamiento
0/_____
%Condiciones de borde para la búsqueda de los valores óptimos
%Limites inferiores
lb=[1.0 0.01]';
%Limites superiores
ub=[40.0 4.00]';
%Inicio de la búsqueda de los valores óptimos
x0=lb;
06_____
%Resuelve la búsqueda de los valores óptimos utilizando la función TdNH
[X]=fminimax(@TdNH,x0,[],[],[],[],lb,ub,[]);
٥،٠
%Sustitución con los valores óptimos
Dd=X(1);
Td=X(2);
%Espectro de Newmark-Hall
D NH=(Tn<=Td).*(Dd./Td).*Tn+((Tn>Td)&(Tn<=4)).*Dd;
%_____
%Precisión del ajuste
%Coeficiente de determinación
E=sum(sum((D-D NH).^2));
Prom=mean(D);
DN=sum(sum((D-Prom).^2));
R=1-E/DN;
%Almacenamiento de los resultados
Resultados Td(1,1)=Dd;
Resultados Td(1,2)=Td;
Resultados Td(1,3) = R;
```

```
%Ajuste del espectro Newmark Hall al espectro de pseudo-aceleración
%Se selecciona el valor de Td encontrado en con el ajuste anterior
Tds=Resultados Td(1,2);
o.c.
%Parámetros para el cálculo de los valores óptimos
%Condiciones de borde para la búsqueda de los valores óptimos
%Limites inferiores
lb=[0.01 1.5 0.01 0.01 Tds]';
%Límites superiores
ub=[1.50 7.0 1.00 Tds-0.01 Tds]';
%Desigualdades lineales
A=zeros(1,5);
A(1,3)=1;
A(1, 4) = -0.99;
b=zeros(1,1);
%_____
%Resuelve la búsqueda de los valores óptimos utilizando la función
%Newmark-Hall Td
[X]=fminimax(@NewmarkHall Td,lb,A,b,[],[],lb,ub,[]);
%_____
%Sustitución con los valores óptimos
Tn=[0:0.01:4]';
PGA=X(1);
alpha A=X(2);
Tb=X(3);
T_{C}=X(4);
Td=X(5);
%Espectro de Newmark-Hall de pseudo-aceleración
NH=(Tn \leq Tb).*(PGA*(1+(alpha A-
1) *Tn./Tb))+((Tn>Tb)&(Tn<=Tc)).*(alpha A*PGA)+((Tn>Tc)&(Tn<=Td)).*(alph
a A*PGA*Tc./Tn)+(Tn>Td).*(alpha A*PGA*Tc*Td./(Tn).^2);
NH(1, 1) = PGA;
06_____
%Precisión del ajuste
%Coeficiente de determinación
E=sum(sum((Sa-NH).^2));
Prom=mean(Sa);
DN=sum(sum((Sa-Prom).^2));
R=1-E/DN;
```

```
%_____
___
%Almacenamiento de los Resultados
Resultados(1,1)=PGA;
Resultados (1,2) = alpha A;
Resultados(1,3)=Tb;
Resultados(1,4)=Tc;
Resultados (1, 5) = Td;
Resultados (1, 6) = R;
of-_____
%Gráficos de los espectros de respuesta junto con el ajuste del
espectro
%Newmark-Hall
figure
plot(Tn,D,'b',Tn,D NH,'r')
grid on
xlabel('Periodo [s]')
ylabel('Desplazamiento [cm]')
figure
plot(Tn, Sa, Tn, NH)
grid on
xlabel('Periodo [s]')
ylabel('Pseudo-aceleración [g]')
<u>ي</u>_____
                        _____
```

#### C.1 Función para realizar el ajuste al espectro de desplazamiento

```
function [ E ] = TdNH( x )
%
Tn=[0:0.01:4]';
%Parámetros
Dd=x(1);
Td=x(2);
%Espectro a ajustar
D=load('D.txt');
%Espectro ajustado
D_NH=(Tn<=Td).*(Dd./Td).*Tn+((Tn>Td)&(Tn<=4)).*Dd;
%Cálculo del error
E=sum(sum((D-D_NH).^2));
end</pre>
```

### C.2 Función para realizar el ajuste al espectro de pseudo-aceleración

```
function [E] = NewmarkHall Td(x)
%Parámetros
Tn=[0:0.01:4]';
%Valores iniciales
PGA=x(1);
alpha A=x(2);
Tb = x(3);
Tc=x(4);
Td=x(5);
%Espectro a ajustar
Sa=load('A.txt');
%Espectro de Newmark-Hall
NH=(Tn \leq Tb) .* (PGA* (1+(alpha A-
1) *Tn./Tb))+((Tn>Tb)&(Tn<=Tc)).*(alpha A*PGA)+((Tn>Tc)&(Tn<=Td)).*(alpha
a A*PGA*Tc./Tn)+(Tn>Td).*(alpha A*PGA*Tc*Td./(Tn).^2);
NH(1, 1) = PGA;
%Cálculo del error
E=sum(sum((Sa-NH).^2));
end
```

## ANEXO D: FORMAS ESPECTRALES OBTENIDAS DEL ANÁLISIS DEL VALOR DE V<sub>s30</sub> COMO PARÁMETRO DE CARACTERIZACIÓN DE SUELO

Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall al espectro percentil 50 de cada grupo de espectros correspondientes al análisis de  $V_{s30}$  como parámetro de caracterización del suelo. Se muestra solamente el ajuste hecho a los espectros percentil 50 de los grupos correspondientes al análisis realizado utilizando las dos componentes horizontales de los registros por separado.



#### D.1 Registros de todo Chile









 $V_{s30} = 236$  m/s (Percentil 50)



### D.2 Registros de la zona central de Chile







## ANEXO E: FORMAS ESPECTRALES OBTENIDAS DEL ANÁLISIS DEL VALOR DE T<sub>0</sub> COMO PARÁMETRO DE CARACTERIZACIÓN DE SUELO

Ajuste del espectro de diseño de Newmark-Hall al espectro percentil 50 de cada grupo de espectros correspondientes al análisis de  $T_0$  como parámetro de caracterización del suelo. Se muestra solamente el ajuste hecho a los espectros percentil 50 de los grupos correspondientes al análisis realizado utilizando las dos componentes horizontales de los registros por separado.



#### E.1 Registros de todo Chile















### E.2 Registros de la zona central de Chile



