

Tabla de Contenido

Agradecimientos	iii
Índice de Tablas	vii
Índice de Figuras	ix
1. Introducción.....	1
1.1. General	1
1.2. Objetivo General	2
1.3. Objetivos Secundarios	2
1.4. Estructura del Trabajo	2
2. Revisión Bibliográfica	4
2.1. Clasificación de Suelos en Normas Internacionales	4
2.1.1. ASCE7-10: Estados Unidos.....	4
2.1.2. Building Standard Law: Japón	7
2.1.3. Eurocode 8: Unión Europea	13
2.1.4. Otras metodologías de clasificación de sitio	15
2.1.5. Clasificaciones mediante periodos predominantes de vibración	19
2.2. Clasificación de Suelos en Norma Chilena NCh433Of.1996 modificada en 2012 21	
2.3. Método de Razones Espectrales H/V.....	25
2.4. Cluster Analysis	25
2.4.1. K-means y Hierarchical Clustering.....	25

2.4.2.	Dynamic Time Warping (DTW)	29
2.4.3.	Algoritmo de Ward	31
3.	Redes Sismológicas.....	32
3.1.	Descripción de redes y estaciones.....	32
3.2.	Ubicación de estaciones	34
3.3.	Sismos registrados.....	39
3.4.	Resumen de información disponible	39
4.	Procesamiento de Datos	44
4.1.	Espectros de Fourier de registros sísmicos y vibraciones ambientales	44
4.2.	Razones espectrales H/V de registros sísmicos y vibraciones ambientales	48
4.3.	Espectros de respuesta.....	50
5.	Caracterización Geotécnica de Estaciones Sismológicas.....	53
5.1.	Periodos Predominantes de Vibración	53
5.2.	Espectros de Fourier de registros sísmicos	58
5.3.	Espectros de Fourier de vibraciones ambientales.....	61
5.4.	Espectros de respuesta.....	64
5.5.	Perfiles de velocidad de onda de corte	69
6.	Cluster Analysis	71
6.1.	Clustering del peak $HVSR_{VA}$	71
6.2.	Suma Euclidiana	74

6.3. Dynamic Time Warping (DTW)	77
7. Análisis de Resultados	80
7.1. Clasificación de estaciones según análisis de cluster	80
7.2. Clasificación de estaciones según <i>HVSR</i> , <i>FAS</i> y <i>Sa/PGA</i>	82
7.3. Clasificación de estaciones	88
8. Conclusiones.....	95
9. Bibliografía	98
Anexo A: Sismos registrados	104
Anexo B: Planillas resumen de estaciones	112

Índice de Tablas

Tabla 1: Clasificación de sitio de los EEUU (ASCE 2010)	5
Tabla 2: Valores coeficiente F_a (ASCE 2010).....	6
Tabla 3: Valores coeficiente F_v (ASCE 2010).....	7
Tabla 4: Clasificación de sitio en Japón (The Building Center of Japan 2016).....	8
Tabla 5: Factor de amplificación sísmica G_s (b)	11
Tabla 6: Clasificación de sitio (British Standards Institution 2004)	13
Tabla 7: Parámetros para espectro “ultimate limit state” (Modificado de British Standards Institution 2004).....	14
Tabla 8: Parámetros para espectro “damage limit state” (Modificado de British Standards Institution 2004).....	14
Tabla 9: Clasificación de suelos de Nueva Zelanda (Semmens et al. 2011).....	16
Tabla 10: Parametrización de C_h (Modificado de Standars New Zealand 2004)	16
Tabla 11: Clasificación de sitio de Perú (Modificado de RNE 2016)	17
Tabla 12: Periodos T_p y T_L (Modificado de RNE 2016)	18
Tabla 13: Factor de suelo S (Modificado de RNE 2016).....	18
Tabla 14: Clasificación de $HVRSR$ según Idini et al. (2016).....	19
Tabla 15: Clasificación de $HVRSR$ según Zhao et al. (2006)	20
Tabla 16: Clasificación de $HVRSR$ según Fukushima et al. (2007).....	20
Tabla 17: Clasificación de $HVRSR$ según Alessandro et al. (2012)	20
Tabla 18: Valor de la aceleración efectiva A_0 (INN 1996)	22

Tabla 19: Clasificación sísmica de suelos (INN 1996)	23
Tabla 20: Valores de los parámetros que dependen del tipo de suelo (INN 1996)	24
Tabla 21: Algoritmo k-means.....	27
Tabla 22: Algoritmo hierarchical clustering.....	29
Tabla 23: Características técnicas y ubicación de estaciones	32
Tabla 24: Información geotécnica disponible de estaciones	41
Tabla 25: Tipo de análisis de ventanas	53
Tabla 26: Periodos predominantes de clasificación de <i>HVSR</i>	54
Tabla 27: Periodos peak de espectros de amplitud de Fourier de registros sísmicos de terremotos	58
Tabla 28: Periodos peaks de S_a/PGA para componentes horizontales de registros de terremotos	65
Tabla 29: Clasificación de estaciones según V_{s30}	69
Tabla 30: Descripción clusters analysis de valores peaks de $HVSR_{VA}$	71
Tabla 31: Descripción clusters analysis de suma euclidiana.....	74
Tabla 32: Descripción clusters analysis de DTW	77
Tabla 33: Clasificación según V_{s30} de NCh433 y valor T_0 de factor de forma espectral	89
Tabla 34: Clasificación de estación según norma actual y propuesta	91
Tabla 35: Estaciones con $HVSR_{VA}$ plano y clasificación según normativa actual	94

Índice de Figuras

Figura 1: Espectro de diseño (ASCE 2010)	7
Figura 2: Aceleración espectral para condiciones “damage-limitation” y “life-safety”	9
Figura 3: Mapa de zonificación sísmica (The Building Center of Japan 2016)	9
Figura 4: Factor de amplificación sísmica G_s	11
Figura 5: Espectro de respuesta elástico “ultimate limit state” con 5% de amortiguamiento (Modificado de British Standards Institution 2004).....	15
Figura 6: Espectro de respuesta elástico “damage limit state” con 5% de amortiguamiento (Modificado de British Standards Institution 2004).....	15
Figura 7: Representación gráfica de C_h	17
Figura 8: Espectro elástico de aceleración para zona sísmica 4.....	19
Figura 9: Factor de forma espectral α	24
Figura 10: Espectro elástico de aceleraciones para zona sísmica 3.....	24
Figura 11: Diferentes formas de aglomerar un set de datos (Tan et al. 2006)	26
Figura 12: Organización jerárquica	27
Figura 13: Algoritmo k-means para encontrar tres clusters (Tan et al. 2006).....	28
Figura 14: Hierarchical clustering mostrado como dendograma y diagrama anidado (Tan et al. 2006)	29
Figura 15: Comparación entre métodos: (a) suma euclidiana y (b) DTW (Arias 2008) ..	30
Figura 16: Matriz de distancias y camino óptimo de DTW (Arias 2008)	30
Figura 17: Figura de la izquierda, ubicación de estaciones en zona comprendida entre Regiones de Arica y Parinacota hasta Región de Antofagasta. No se incluyen	

estaciones ubicadas en las áreas urbanas de Iquique y Alto Hospicio. Figura de la derecha, ubicación de estaciones en las ciudades de Iquique y Alto Hospicio.	35
Figura 18: Figura de la izquierda, estaciones ubicadas en la Región de Coquimbo. No se incluyen estaciones ubicadas en las zonas urbanas de Coquimbo y La Serena. Figura de la derecha, estaciones ubicadas en las ciudades de Coquimbo y La Serena.	36
Figura 19: Figura superior izquierda, estaciones ubicadas en las Regiones de Valparaíso y Metropolitana. No se incluyen estaciones ubicadas en el área metropolitana de Santiago, Valparaíso y alrededores. Figura superior derecha, estaciones ubicadas en el área metropolitana de Santiago. Figura inferior, estaciones ubicadas en Valparaíso, Viña del Mar y alrededores.	37
Figura 20: Estaciones ubicadas en la zona comprendida entre las Regiones del Maule y Los Ríos	38
Figura 21: Distribución de sismos registrados según magnitud	39
Figura 22: Suavizado de espectro de Fourier para registro de terremoto 2015 en estación Ciudad Empresarial componente NS	45
Figura 23: Espectros de amplitud de Fourier para la estación Ciudad Empresarial (R12M).	45
Figura 24: Selección de ventanas para registro de Ciudad Empresarial.....	47
Figura 25: Espectro de amplitud de vibraciones ambientales en registro de Ciudad Empresarial (R12M), componente NS.....	47
Figura 26: Espectro de amplitud para todos los registros de vibraciones ambientales en estación Ciudad Empresarial (R12M).....	48
Figura 27: Razón Espectral H/V de registros sísmicos de estación Ciudad Empresarial (R12M). La escala de grises de los eventos individuales es proporcional a la magnitud del evento.....	49

Figura 28: Selección de ventanas para $HVSR_{VA}$ de registro de estación Ciudad Empresarial (R12M)	49
Figura 29: Razón Espectral H/V para un registro de Ciudad Empresarial (R12M).....	50
Figura 30: Razón Espectral H/V con todos los registros de vibraciones ambientales de estación Ciudad Empresarial (R12M).....	50
Figura 31: Espectro de respuesta por componente para estación Ciudad Empresarial (R12M)	52
Figura 32: Espectros de respuesta normalizados promedio de estación Ciudad Empresarial (R12M)	52
Figura 33: Ejemplos de clasificación de curvas $HVSR_{VA}$ según Idini et al. (2016).....	56
Figura 34: Comparación de periodo peak promedio $HVSR_S$ y $HVSR_{VA}$	57
Figura 35: Comparación entre periodos peaks de $HVSR_S$ y $HVRSR$	57
Figura 36: Comparación entre periodos peaks de FAS_S entre componentes horizontales y vertical	59
Figura 37: Espectros de amplitud de Fourier de registros sísmicos con magnitud entre 5 y 5.5 para estaciones con $HVSR_{VA}$ plano (PB03, PB04, T06A y T12A). Las líneas segmentadas indican la desviación estándar.....	60
Figura 38: Comparación de periodos peak de $HVSR_{VA}$ y FAS_S para registros de terremotos	61
Figura 39: Espectros de amplitud de Fourier con registros de vibraciones ambientales proveniente de sismógrafos banda ancha (CO02 y PB15). La flecha verde indica la ubicación del peak de $HVSR_{VA}$. Las líneas segmentadas indican la desviación estándar.	62

Figura 40: Espectros de amplitud de Fourier con registros de vibraciones ambientales proveniente de acelerógrafos (T03A y T10A). La flecha verde indica la ubicación del peak de $HVSR_{VA}$. Las líneas segmentadas indican la desviación estándar.	62
Figura 41: Espectros de amplitud de Fourier con registros de vibraciones ambientales provenientes de campañas en terreno y peak horizontal no coincidente con peak HVSR (C26O, CRMA, R18M y VALD). La flecha verde indica la ubicación del peak de $HVSR_{VA}$. Las líneas segmentadas indican la desviación estándar.....	63
Figura 42: Espectros de amplitud de Fourier con registros de vibraciones ambientales provenientes de campañas en terreno y peak horizontal coincidente con peak HVSR (ANGOL, CSCH, CURI y R21M). La flecha verde indica la ubicación del peak de $HVSR_{VA}$. Las líneas segmentadas indican la desviación estándar.	64
Figura 43: Espectros Sa/PGA de estaciones con $HVSR_{VA}$ plano (C22O, HMBCX, R05M y T12A).....	66
Figura 44: Comparación de periodo peak entre FAS_S y Sa/PGA para estaciones con peak identificable y terremoto.....	67
Figura 45: Comparación de espectros FAS_S y Sa/PGA de terremotos de estaciones R12M, T13A y LLO.....	68
Figura 46: Comparación de periodos peak de $HVSR$ de vibraciones ambientales y Sa/PGA . Escala de 0 a 2 [s]	68
Figura 47: Resultados de clustering vía peak.....	72
Figura 48: Dendograma de cluster analysis con valores peaks de $HVSR_{VA}$	73
Figura 49: Resultados de clustering vía suma euclidiana	75
Figura 50: Espectros horizontales Sa/PGA de registros de terremotos de cluster tipo banda [3]	75
Figura 51: Dendograma de cluster analysis con suma euclidiana.....	76

Figura 52: Resultados de clustering vía DTW	78
Figura 53: Dendograma de cluster analysis con DTW	79
Figura 54: Curvas $HVSR_{VA}$ seleccionados para clasificación en base a los 3 métodos de análisis	81
Figura 55: Promedio de curvas $HVSR_{VA}$ de clusters seleccionados para clasificación junto con desviación estándar y límites de clasificación.....	81
Figura 56: $HVSR$, FAS_S y Sa/PGA de estación Canela (C12O).....	82
Figura 57: $HVSR$, FAS_S y Sa/PGA de estaciones Talca (TAL) y 5ta Comisaría - Viña del Mar (V02A).....	83
Figura 58: $HVSR$, FAS_S y Sa/PGA de estaciones Minita (MNM CX) y La Higuera (C09O)	84
Figura 59: $HVSR$, FAS_S y Sa/PGA de estaciones Pozo Almonte (T07A) y Huara - Tenencia (T10A).....	85
Figura 60: $HVSR$, FAS_S y Sa/PGA de estaciones Ruta A-16 (T02A) y Viña Centro (VINA)	86
Figura 61: $HVSR$, FAS_S y Sa/PGA de estaciones Camiña (T11A) y Melipilla (R19M)	87
Figura 62: $HVSR$, FAS_S y Sa/PGA de estaciones Concepción (CONC) y Aeropuerto SCL (R21M)	88
Figura 63: Comparación de clasificación de $HVSR$ para registros de estación Ciudad Empresarial	89
Figura 64: Espectro elástico de diseño de aceleración para zona sísmica 3 junto con el valor de T_0 para cada tipo de suelo en línea segmentada.....	90

Figura 65: Propuesta de clasificación junto con valores teóricos de velocidad y periodo para un depósito de 30 [m] en línea segmentada. Los puntos corresponden a estaciones con información de V_{s30} y periodo dominante $HVSR_{VA}$91

Figura 66: Espectros S_a/PGA normalizados de componentes horizontales de estaciones que clasifican como el mismo tipo de suelo según propuesta de clasificación sísmica. 93