



Estudio de efectos de sitio en la Región de Coquimbo durante el terremoto de Illapel M_w 8.3 de 2015

Study of site effects in the Coquimbo Region due to the 2015 M_w 8.3 Illapel, Chile, Earthquake

Fecha de entrega: 6 de diciembre 2016

Fecha de aceptación: 24 de abril 2017

José Fernández¹, César Pastén¹, Sergio Ruiz² y Felipe Leyton³

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Av. Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile, jose.fernandez@ing.uchile.cl, cpasten@ing.uchile.cl

² Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, Av. Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile, sruiz@dgf.uchile.cl

³ Centro Sismológico Nacional, Universidad de Chile, Av. Beaucheff 1225, Santiago, Chile, leyton@csn.uchile.cl

Este trabajo tiene como objetivo determinar efectos de sitio en las localidades de la Región de Coquimbo producidos por el terremoto Illapel M_w 8.3 de 2015, particularmente aquellas que cuentan con estaciones sismológicas. Se relaciona la respuesta sísmica y la distribución de daños durante el evento con la geomorfología y geología de los sitios. Para ello se emplearon razones espectrales H/V (HVSr) calculadas a partir de registros de aceleraciones de sismos con magnitud moderada a alta ($M_w \geq 5$), ocurridos en una ventana temporal de tres años en torno al evento principal. Por otra parte, el método HVSr fue también aplicado a mediciones pasivas de vibraciones ambientales de corta duración (20 a 30 minutos), realizadas con sismógrafos de 4.5 Hz. A partir de ambas variantes del método, se obtuvieron razones espectrales en función del periodo, caracterizando dinámicamente los suelos por medio de su periodo predominante de vibración. Esta información se contrastó con la geología y geomorfología de las localidades, para explicar los efectos de sitio en cada una de ellas. Finalmente, se compararon los resultados con estimaciones de intensidad calculadas a partir de un catastro de viviendas dañadas producto del terremoto, elaborado por instituciones gubernamentales. Se concluye que las estaciones sismológicas de la Región de Coquimbo se encuentran en su mayoría sobre depósitos de suelo rígido o en afloramientos rocosos, lo que es consistente con que las intensidades MSK alcanzaran valores máximos de 6.5 en la Región.

Palabras clave: efectos de sitio, razones espectrales H/V, intensidades MSK

This work aims to determine site effects in the Coquimbo Region due to the 2015 M_w 8.3 Illapel earthquake, particularly in towns with seismological stations. In addition, it seeks to relate the seismic response and the distribution of damage during the event with the geomorphology and geology of the sites. This study used H/V spectral ratios (HVSr) applied to acceleration records of moderate to high magnitude earthquakes ($M_w \geq 5$) occurred in a time window of three years around the main event. Moreover, the HVSr method was also applied to seismic ambient vibration records (20 to 30 minutes long), recorded by 4.5 Hz seismographs. Both variations of the method generated spectral ratios as a function of the period, allowing the dynamic characterization of the soil deposits through their predominant vibration period. This information is complemented with the geology and geomorphology of the studied zones in order to explain the site effects in each one. Finally, the results are compared with calculated MSK intensities from a survey of housing damage caused by the earthquake, implemented by government institutions. Our analyses conclude that the seismological stations of the Coquimbo Region are mostly over rigid soil deposits and rock outcrops, which is consistent with the MSK intensities that reached maximum values of 6.5 in the Region.

Keywords: site effects, HV spectral ratios, MSK intensities

Introducción

Chile ha sido azotado históricamente por terremotos de gran magnitud ($M_w > 8$). En particular, desde 2010 se han

sumado los terremotos del Maule 2010 M_w 8.8, Iquique 2014 M_w 8.2 e Illapel 2015 M_w 8.3. El terremoto de Illapel M_w 8.3 ocurrió el 16 de septiembre de 2015 a las 19:54:31



hora local, con un hipocentro ubicado en 31.64°S y 71.75°W y 23 km de profundidad (Centro Sismológico Nacional, CSN). Este terremoto ocurre en la parte superficial del contacto de placas con una ruptura Sur-Norte (Ruiz *et al.*, 2016). La intensidad reportada por la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública (ONEMI) en escala Mercalli Modificada (MM) fue de VIII en la Región de Coquimbo y V en la Región de Atacama, lo que implica una rápida atenuación del terremoto hacia el norte. Además, tanto en las Regiones de Valparaíso como Metropolitana, la intensidad fue de VII en la misma escala. El evento afectó a 7285 viviendas (Gobierno de Chile, 2015) y en conjunto con el tsunami posterior dejaron 13 víctimas fatales (GEER, 2015). Algunos de los registros de aceleraciones asociados al terremoto se exhiben en la Figura 1, mientras que las aceleraciones máximas PGA registradas se muestran en la Tabla 1.

En la zona del terremoto de Illapel 2015 han ocurrido previamente los terremotos de Illapel 1943 y Punitaqui 1997 (Beck *et al.*, 1998; Lemoine *et al.*, 2001; Pardo *et al.*, 2002). El primero ocurrió el día 6 de abril de 1943 a las 12:07 hora local, con epicentro de coordenadas 30.75°S y 72.00°W , frente a la desembocadura del Río Limarí y tuvo una magnitud $M_w = 7.8$ (Beck *et al.*, 1998). Su profundidad fue de 55 km y el tamaño de la ruptura alcanzó los 200 km aproximadamente (Beck *et al.*, 1998), siendo similar en ubicación, magnitud e incluso en longitud de ruptura al terremoto de Illapel 2015. En cuanto a sus efectos, se cuentan 12 víctimas fatales, 49 heridos y más de 23000 damnificados (El Mercurio, 2007), además de daños severos a la infraestructura. Localidades como Combarbalá, Punitaqui, Limarí y otras quedaron con el 80% de sus viviendas inhabitables (Piñones, 2002). Con la información de la zona, se confeccionó un mapa de isosistas (Greve, 1946) que reveló intensidades V (medidas en una escala de intensidades con valor máximo VI) en torno al

epicentro, es decir, Ovalle, Combarbalá e Illapel, mientras que Ovalle registró una intensidad de VIII en escala MSK. Se debe considerar que, durante la época, la población se concentraba en los valles centrales de la depresión intermedia de la Región y no en la costa (Piñones, 2002).

El 14 de octubre de 1997 a las 22:03:30 hora local se produjo el terremoto de Punitaqui, de tipo intraplaca de profundidad intermedia en la Placa de Nazca. El epicentro se ubicó a 10 km al norte de Punitaqui (31.02°S y 71.23°W) y registró una magnitud $M_w = 7.1$ (Lemoine *et al.*, 2001; Pardo *et al.*, 2002). La estación más cercana estaba en Illapel y registró una aceleración máxima de 0.35g en la componente horizontal N70°E (Díaz, 2001). De acuerdo con reportes de ONEMI y Carabineros, el sismo fue sensible desde Taltal (Región de Antofagasta) hasta Angol (Región de la Araucanía) con intensidad II en escala MM en ambas localidades (ONEMI, 1997). A partir de los daños evidenciados en el adobe, se calcularon intensidades en escala MSK que variaron entre V y VIII en las distintas localidades de la Región de Coquimbo (Díaz, 2001).

Considerando la respuesta sísmica de la región, el objetivo principal de este trabajo es relacionar el nivel de daños percibidos y registrados producto del terremoto M_w 8.4 de 2015 con la rigidez de los depósitos de suelo. Para ello, se caracterizaron los suelos de las distintas comunas, determinando su geología y calculando razones espectrales H/V a partir de registros sísmicos (Lermo y Chávez-García, 1993), obtenidos en las estaciones sismológicas mostradas en la Figura 1, y a partir de registros de vibraciones ambientales (Nakamura, 1989). Paralelamente, se realizó un estudio de daños enfocado a obtener intensidades en la escala MSK (Medvedev *et al.*, 1964) mediante la metodología propuesta por Monge y Astroza (1989), la cual contrasta la distribución de los distintos grados de daños en las estructuras con los grados de intensidad de esta escala.

Tabla 1: Aceleraciones máximas PGA del terremoto de Illapel 2015 registradas en las estaciones de la Región de Coquimbo

Estación		PGA, g		
Código	Ubicación	NS	EW	Z
C01O	La Serena	0.18	0.15	0.12
C09O	La Higuera	0.19	0.19	0.09
C11O	Monte Patria	0.71	0.83	0.48
C19O	Las Tacas	0.11	0.12	0.10
C20O	Hospital Coquimbo	0.25	0.26	0.18

Estación		PGA, g		
Código	Ubicación	NS	EW	Z
C22O	UCN Guayacán	0.13	0.09	0.07
C26O	Tongoy	0.23	0.36	0.13
C33O	Estadio La Portada	0.11	0.14	0.07
CO03	Pedregal	0.29	0.35	0.20
GO04	Obs. Cerro Tololo	0.34	0.24	0.16

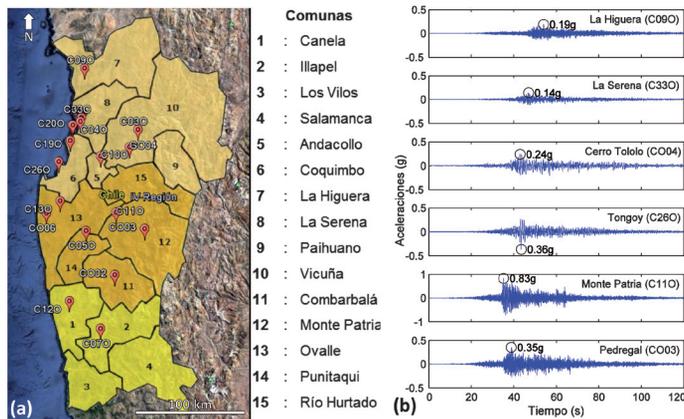


Figura 1: Región de Coquimbo. a) Distribución de estaciones sísmológicas en las comunas de la Región y b) registros de aceleraciones del terremoto de Illapel 2015 en la componente EW de 6 estaciones ubicadas de norte a sur.

Para esto, se utilizó un catastro de daños elaborado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo MINVU después del terremoto (comunicación personal, solicitud mediante Ley de Transparencia N°20.285, 29 de julio de 2016), donde se califica la situación de las viviendas de la región y se compara con el total de viviendas reportadas por el Censo no oficial de 2012.

Caracterización de suelos

La caracterización de los suelos se realizó por medio de la geología y el método de las razones espectrales H/V (HVSr) aplicado tanto a registros sísmicos como a registros de vibraciones ambientales.

Geología

De acuerdo con la descripción geomorfológica realizada por Börgel (1983), la Región de Coquimbo está caracterizada fundamentalmente por la presencia de dos grandes unidades morfológicas. La primera se manifiesta en la fuerte presencia de cordones montañosos transversales que conectan la Cordillera de Los Andes con la Cordillera de la Costa, promoviendo la formación intensa de valles en la Depresión Intermedia. Estos cordones adquieren alturas de 600 a 1000 msnm, en disposición E-W principalmente, y se ven originados por la erosión de quebradas y ríos, destacando las cuencas de Elqui, Limarí y Choapa. Así, la región se caracteriza por presentar una compleja faja interna de relieve montañoso de 50 km de ancho aproximadamente, además de pequeñas cuencas tectónicas y corredores longitudinales N-S. Por otra parte, las

planicies litorales pueden ser de 3 tipos: fluviales, marinas o fluvio-marinas. Esta morfología alcanza un desarrollo de 30 km de ancho entre La Serena y Tongoy, gracias a la desembocadura de ríos, con alto nivel de depositación de materiales, formando dunas y playas continentales. Dentro del contexto geomorfológico anterior y a partir de cartas geológicas (Aguirre y Egert, 1970; Moscoso *et al.*, 1982; Mpodozis y Cornejo, 1988; Rivano y Sepúlveda, 1991; Thomas, 1967) y otros trabajos (Rosales, 1988; García, 1999), es posible obtener la geología local para cada estación sísmológica. Esta información se muestra en la Tabla 2, de donde es posible distinguir que gran parte de las localidades se encuentra sobre depósitos aluviales o similares de época cuaternaria, lo que coincide con el asentamiento poblacional de la región en torno a los valles fértiles de los ríos de la zona. Por otro lado, las zonas costeras están principalmente sobre rocas antiguas (jurásicas) lo que es concordante con la edad de la Cordillera de la Costa, pero también sobre terrazas de deposición marina y fluvial.

Razones espectrales H/V

Las curvas HVSr se calcularon a partir de registros de aceleraciones medidos en las estaciones de la Tabla 2 y mediciones de vibraciones ambientales. Los registros sísmicos se obtuvieron entre enero de 2013 y marzo de 2016 y corresponden a eventos de magnitud igual o superior a 5. Los registros de vibraciones ambientales se obtuvieron con sismógrafos Tromino® de 3 componentes y 4.5 Hz de frecuencia natural en campañas realizadas por el Centro Sismológico Nacional y los Departamentos de Ingeniería Civil y Geofísica (Universidad de Chile). Las razones espectrales H/V (Lermo y Chávez-García, 1993) se obtuvieron con el software Geopsy® para frecuencias entre 0.2 y 25 Hz seleccionando ventanas de 30 s de largo en la señal y utilizando filtro propuesto por Konno y Ohmachi (1998) con una constante de suavizado $b = 40$.

El procesamiento de registros sísmicos se realizó aplicando filtros tipo Butterworth de orden 4 entre 0.2 y 25 Hz a cada una de las componentes horizontales y la vertical. Luego, se empleó la transformada de Fourier suavizada con una media móvil de vecindad 0.25 Hz para cada componente, se combinaron las horizontales con una media geométrica y se dividió la componente horizontal combinada por la componente vertical para obtener las razones espectrales



Tabla 2: Geología de las localidades con estaciones sismológicas

Comuna	Localidad	Estación Sismológica	Geología	Descripción
Coquimbo	Las Tacas	C190	Kt (Kg/QTm)	Rocas volcánicas andesíticas con brechas y tobas (riolíticas)
	Coquimbo	C200	Tec (JKg/Qal)	Sedimentos marinos aterrazados, areniscas, calcoarenitas
	Coquimbo	C220	JKg	Granito
	Tongoy	C260	Ja (Qal)	Rocas volcánicas andesíticas y sedimentarias clásticas continentales
La Higuera	La Higuera	C090	Tega/Qal (Kg)	Gravas de Atacama, poco consolidadas, incluyendo depósitos de ríos aterrazados
Vicuña	Cerro Tololo	GO04	Kle (Kv)	Rocas volcánicas andesíticas basálticas y riolíticas, intercalada con sedimentarias
La Serena	Las Compañías	C010	Qal	Depósitos aluviales cuaternarios
	La Serena	C330	Qal	Depósitos aluviales cuaternarios
Combarbalá	Combarbalá	CO02	Qal (Kqmc/Kqmt)	Depósitos aluviales cuaternarios y conglomerados, tobas y brechas
Monte Patria	Monte Patria	C110	Qal (Kv)	Depósitos aluviales cuaternarios y rocas volcánicas
	Pedregal	CO03	Qac (Kv/ah)	Sedimentos aluviales y coluviales, depósitos de relleno de valles
Ovalle	Ovalle	-	Qal/Qc (Kra/Ka)	Depósitos aluviales cuaternarios y sedimentos continentales
	Limarí	C130	Qal (Qc)	Depósitos aluviales cuaternarios y sedimentos continentales
	Angostura	CO06	Jgd (Jdn)	Granito a granodiorita, diorita gnéisica
Punitaqui	Punitaqui	C050	Qc (Kg)	Sedimentos continentales y granito
Canela	Canela Baja	C120	Qc/Jmi4	Sedimentos continentales con intrusivos (granodioritas y tonalitas)
Illapel	Illapel	C070	Qac/Tc (Ki1)	Sedimentos aluviales y coluviales con conglomerados, areniscas, brechas, limolitas
Los Vilos	Los Vilos	-	Qal (Jmi1/Dca)	Depósitos aluviales además de lutitas, areniscas y estratificación gradada. Monzogranitos y sienogranitos.
Salamanca	Salamanca	-	Qac (Ki1)	Sedimentos aluviales y coluviales junto con granodioritas (intrusivos)

HVSR. En la Figura 2 se muestran las HVSR en función del periodo y la cantidad de eventos considerados en cada estación.

De acuerdo con la propuesta de clasificación de suelos de Idini (2016), se consideran suelos rígidos aquellos que presentan HVSR planas para todo el rango de periodos o que poseen un periodo predominante de vibración menor a 0.4 s. Según estos criterios, es posible observar que en la Región de Coquimbo los suelos de las estaciones ubicadas

en Las Tacas C190, campus Guayacán de la Universidad Católica del Norte C220, La Higuera C090, estadio La Portada en La Serena C330, Combarbalá CO02, Monte Patria C110, sector El Pedregal CO03, Angostura CO06, Punitaqui CO05, Canela Baja C120 e Illapel C070 son rígidos, a diferencia de los suelos de las estaciones Hospital de Coquimbo C200, Tongoy C260, Observatorio Cerro Tololo GO04, Las Compañías en La Serena C010 y el sector de Limarí C130, que no cumplen con estas condiciones.

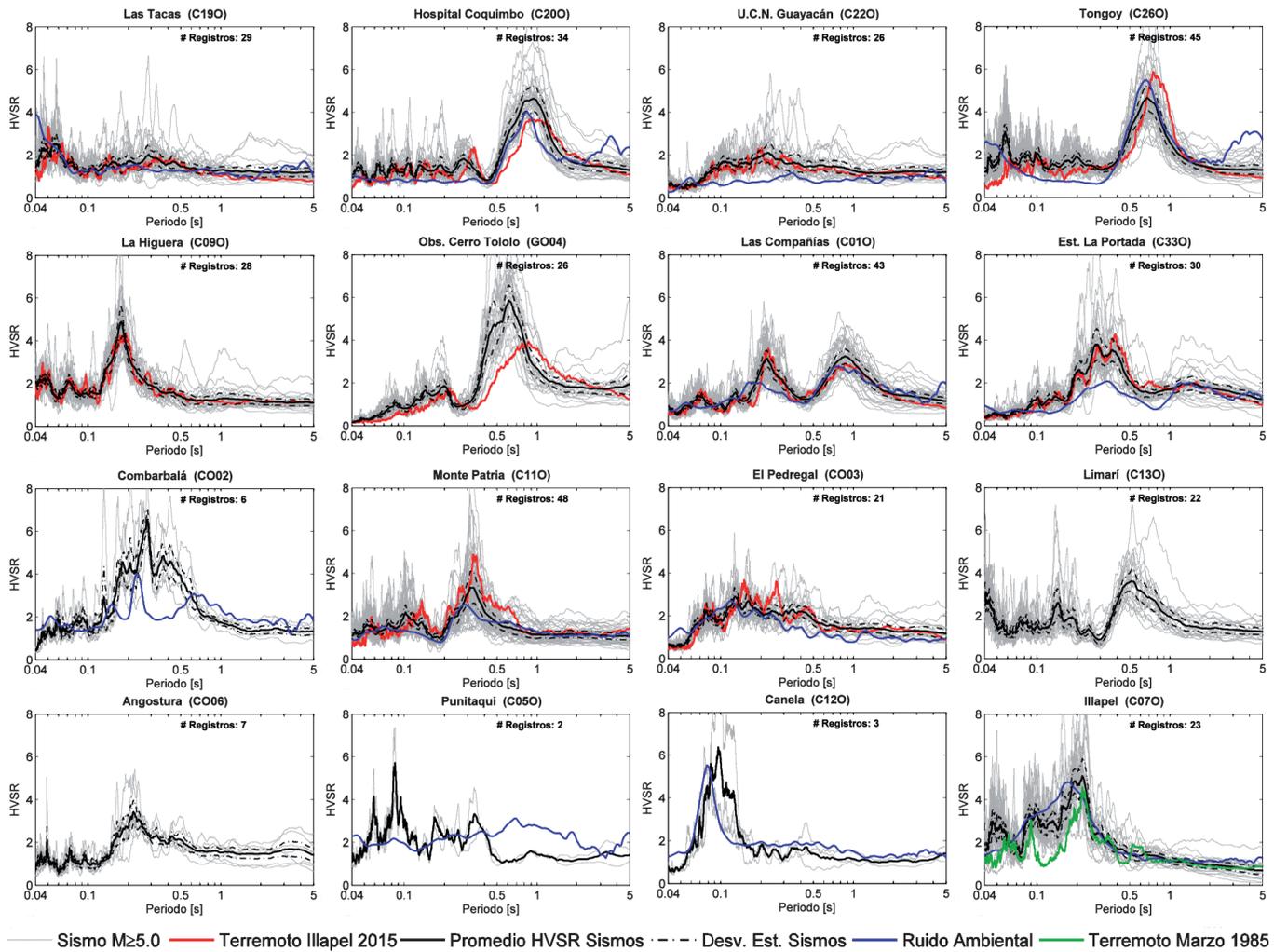


Figura 2: Resultados de razones espectrales H/V para las 16 estaciones sismológicas en la Región de Coquimbo con actividad registrada entre 2013 y 2016. Diez de estas estaciones registraron el Terremoto de Illapel 2015 y 12 cuentan con mediciones de vibraciones ambientales

En la Figura 2 se puede observar consistencia en la estimación de los periodos predominantes de vibración con ambas metodologías de razones espectrales, con la sola excepción de Punitaqui C050, que sólo cuenta con dos registros sísmicos. A modo de comparación, en la Figura 2 se muestra también la razón espectral del registro del terremoto de Valparaíso 1985 en la estación de Illapel, perteneciente a la Red de Cobertura Nacional de Acelerógrafos de la Universidad de Chile (RENADIC), que coincide con los resultados de sismos de menor magnitud registrados en la estación C070.

Adicionalmente, se estimaron algunos perfiles de velocidad de onda de corte mediante correlaciones cruzadas de ruido sísmico (Sáez, 2016) e inversiones con el software Geopsy®, utilizando generación Monte Carlo

de perfiles y considerando el ajuste tanto de curvas de dispersión como de HVSR. Estos resultados dan cuenta de depósitos de suelos rígidos con un rápido aumento de V_s en profundidad. La Figura 3 muestra los resultados para las estaciones de Limarí C130 y Tongoy C260, donde se muestran los perfiles que poseen como máximo 1.5 veces el mínimo error de ajuste (*misfit*) con respecto a las curvas de dispersión y las HVSR medidas, lo que representa una confiabilidad estadística del orden del 90%.

Registros de daños

El trabajo realizado en torno a los daños dice relación con el cálculo de intensidades en la escala Medvedev - Sponheuer - Karnik MSK (Medvedev *et al.*, 1964), de acuerdo a las adaptaciones al caso de Chile realizadas

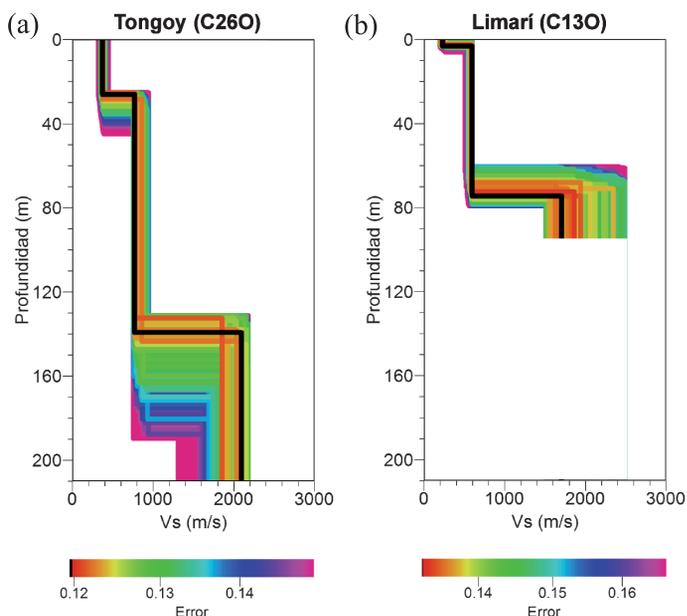


Figura 3: Perfiles de velocidad de onda de corte V_s en las estaciones de: a) Limarí C130 y b) Tongoy C260. La escala de colores representa el error de ajuste asociado a cada perfil y la curva negra el perfil con menor error. La profundidad máxima de los perfiles está dada por la máxima longitud de onda que captura el método de las correlaciones cruzadas (Sáez, 2016).

por Monge y Astroza (1989). La metodología consiste en determinar el grado de intensidad a partir de la distribución de daños observados en viviendas de cierta materialidad en una localidad. El trabajo original detalla 6 grados de daños, desde la categoría N0: sin daños, hasta la N5: caída de más de un muro. Esta evaluación se realiza por medio de visitas a terreno y encuestas en una zona aleatoria y representativa de la localidad en estudio.

La información de daño disponible del terremoto de Illapel 2015 corresponde a un catastro realizado por el MINVU, con el objetivo de distribuir recursos para la reparación y reconstrucción de viviendas. Este catastro contempla 5 categorías de daño: sin daños, daños reparables leves, daños reparables moderados, daños reparables mayores y daños no reparables, e incluye distintos tipos de materialidad de las viviendas. Por esta razón, se adaptó el trabajo realizado por Díaz (2001), quien homologó ambas escalas de daños para lograr consistencia en la asignación de intensidades MSK al adobe en la Región de Coquimbo después del terremoto de Punitaqui 1997. La Figura 4 muestra fotografías de estructuras dañadas en la Región de Coquimbo.

Tabla 3: Localidades, daños e intensidad asociadas a los terremotos de Punitaqui 1997 (Díaz, 2001) e Illapel 2015

Comuna	Localidad	Estación	MSK 1997	Censo 2012	Daños en adobe 2015					MSK 2015
					D0	D1	D2	D3	D4	
Coquimbo	Las Tacas	C190	S/I	2633	2577	10	12	22	12	<5
	Coquimbo	C200	5.0							
	Coquimbo	C220	5.0							
	Tongoy	C260	5.5							
La Higuera	La Higuera	C090	5.5	79	-	-	-	-	-	S/I
Vicuña	Cerro Tololo	GO04	N/A	1044	848	17	57	79	43	<5
La Serena	Las Compañías	C010	5.0	1801	1752	4	6	16	23	<5
	La Serena	C330	5.0							
Combarbalá	Combarbalá	CO02	6.5	1292	946	25	55	84	182	5.5
Monte Patria	Monte Patria	C110	6.5	1618	1123	35	67	131	262	6.0
	Pedregal	CO03	6.5							
Ovalle	Ovalle	-	7.0	1738	1468	22	51	90	107	<5
	Limarí	C130	5.0							
	Angostura	CO06	S/I							
Punitaqui	Punitaqui	C050	7.5	473	369	6	17	39	42	5.0
Canela	Canela Baja	C120	5.5	987	501	33	72	123	258	6.5
Illapel	Illapel	C070	6.5	473	298	17	32	41	85	6.0
Los Vilos	Los Vilos	-	S/I	276	271	1	1	2	1	<5
Salamanca	Salamanca	-	6.5	378	224	4	24	48	78	6.0

D0: sin daño, D1: daño leve, D2: daño moderado, D3: daño mayor, D4: daño irreparable, S/I: sin información, N/A: no aplica



Figura 4: Fotografías de estructuras dañadas en localidades de la Región de Coquimbo tomadas en enero de 2016. a) Iglesia de Monte Patria, b) derrumbe de vivienda en Illapel, c) y d) viviendas contiguas en Combarbalá de adobe, con y sin daños, respectivamente.

El procedimiento para determinar la intensidad MSK consistió en obtener la cantidad de viviendas dañadas del catastro del MINVU, complementar con el total de viviendas obtenido del Censo 2012 y contrastar los porcentajes de distribución de daños con las curvas patrón de intensidades homologadas. Este análisis se realizó sólo para viviendas de adobe, pues presentan un mayor nivel de daño y porque la homologación solo se encuentra disponible para este caso. Además, las estructuras de adobe manifiestan un comportamiento rígido con periodos predominantes de vibración menores a 0.3 s (Morales *et al.*, 1980), por lo que se espera que sean más sensibles a los períodos predominantes de los suelos reportados en la Figura 2. Las intensidades calculadas con esta metodología se muestran en la Tabla 3 y se comparan con las reportadas por Díaz (2001) para el terremoto de Punitaqui de 1997. Los resultados muestran que las intensidades percibidas por el adobe para el terremoto de Punitaqui son mayores que para el de Illapel 2015 en la mayoría de las comunas analizadas.

De acuerdo a los Censos de 1992, 2002 y 2012, las viviendas en la Región pasaron de 115986 a 255613 en 20 años, concentrándose principalmente en las comunas de La Serena y Coquimbo (23 y 24% en 1992, 26 y 26% en 2002 y 28 y 27% en 2012, respectivamente), seguidas de Ovalle

y Monte Patria (14 y 5% en 2012, respectivamente). Esta condición genera un desbalance en la interpretación de la materialidad representativa de la región. Considerando las dos comunas más grandes en 1992, el adobe era el material predominante (34%), seguido de la madera (31%). En 2012, el escenario cambió y la albañilería representaba el 47% de las viviendas, seguida de la madera con un 24% y el adobe con un 9%.

Si bien es cierto que el Censo de 2012 no es oficial por problemas metodológicos, los resultados de materialidad pueden ser confiables en cuanto el instrumento obliga el registro de las viviendas sin importar la cantidad de ocupantes. El levantamiento de información del MINVU corresponde a sectores identificados previamente con algún tipo de daño, con énfasis en zonas rurales, y complementado con peticiones de la población afectada. Esto puede generar un sesgo de la información al no tener cobertura adecuada ni aleatoriedad de la muestra.

Contrastando la totalidad de viviendas con la cantidad dañada según la encuesta MINVU, las comunas más afectadas fueron Canela, con un 21% de sus viviendas damnificadas, Río Hurtado (17%), Illapel (15%), Punitaqui (9%) y Monte Patria (8%). Mientras que los materiales más dañados fueron adobe (29% de las viviendas encuestadas fueron dañadas), albañilería (25%) y madera (11%). Cabe destacar que la encuesta del Gobierno consta de 9317 viviendas evaluadas, de las cuales 7285 presentan algún tipo de daño. Además, el 31% del total no tiene identificación del material de construcción y tan solo 2336 corresponden a adobe (Gobierno de Chile, 2015), dentro de un total de 12792 viviendas de este material en las comunas con estaciones sismológicas.

Conclusiones

Las razones espectrales calculadas a partir de sismos y de vibraciones ambientales son consistentes aun cuando se aprecia una degradación de rigidez producto de la magnitud del evento sísmico, mostrando el *peak* del terremoto un periodo más alto respecto al promedio de las curvas.

La información geológica de la Tabla 2 es consistente con las HVSr de la Figura 2, ya que gran parte de las estaciones se encuentra sobre depósitos de suelo rígidos o afloramientos rocosos. Los resultados muestran que los periodos predominantes de vibración de los suelos



de la mayoría de las estaciones son menores a 0.4 s, lo que concuerda con que el material más dañado durante el terremoto fuera el adobe, aun cuando su participación en la totalidad de viviendas en la región no supera el 9%, aproximadamente.

Monte Patria parece ser un caso excepcional, puesto que la aceleración máxima registrada es más del doble que en otras estaciones y no se identifica un efecto notorio de degradación de rigidez en las curvas H/V. Esto puede implicar un efecto de amplificación topográfica que se debe estudiar con más detalle.

Las intensidades calculadas para el terremoto de Illapel 2015, a pesar de incluir pocas viviendas, son menores a las reportadas para el terremoto de Punitaqui 1997.

Referencias

Aguirre, L. y Egert, E. (1970). *Geología del cuadrángulo Lambert (La Serena), Región de Coquimbo*. Instituto de Investigaciones Geológicas, Chile. Carta Geológica N° 23

Beck S, Barrientos S, Kausel E, Reyes, M. (1998) Source characteristics of historic earthquakes along the central Chile subduction zone. *Journal of South American Earth Sciences* 11(2): 115-129.

Börgel, R. (1983). *Geomorfología (Geografía de Chile)*. Instituto Geográfico Militar. Vol. 2

Díaz, O. (2001). *Estudio de los efectos de las condiciones locales en el terremoto de Punitaqui 1997*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile

El Mercurio (2007). Chile tiembla otra vez. Santiago, Chile, 18 de noviembre de 2007. p. D10

García, J.M. (1999). *Hidrogeología del sector de Salamanca, Provincia de Choapa, IV Región*. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile

GEER (2015). Geotechnical reconnaissance of the 2015 Mw 8.3 Illapel, Chile Earthquake. Geotechnical Extreme Events Reconnaissance Association

Gobierno de Chile (2015). Plan de Reconstrucción Región de Coquimbo 2015. Ministerio de Vivienda y Urbanismo, http://www.minvu.cl/opensite_20151002093225.aspx

Greve, F. (1946). *Descripción de los principales efectos y ubicación del epicentro de los sismos destructores sentidos en Chile en los años 1942-43-44-45 y 46*. Instituto Sismológico de la Universidad de Chile

Idini, B.R. (2016). *Curvas de atenuación para terremotos intraplaca e interplaca en la zona de subducción chilena*. Tesis para optar al grado de Magíster, Universidad de Chile

Konno, K. and Ohmachi, T. (1998). Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America* 88(1), 228-241

Lemoine A, Campos J, Madariaga R. (2001). Evidence for earthquake interaction in the Illapel Gap of central Chile. *Geophysical Research Letters* 28(14): 2743-2746.

Lermo, J. and Chávez-García, F.J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bulletin of the Seismological Society of America* 83(5): 1574-1594

Medvedev, S., Sponheuer, W. und Kárník, V. (1964). Neue seismische Skala. Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin 77

Monge, J. y Astroza, M. (1989). Metodología para determinar el grado de intensidad a partir de los daños. *5as Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Santiago, vol.1, 483-492

Morales, R.M., Olano, A.S., Cabrejos, R.T. y Morales, O. (1980). Estudio sísmico de construcciones de adobe de dos pisos. *Anales III Congreso Nacional de Ingeniería Civil*, Perú

Mpodozis, C. y Cornejo, P. (1988). *Geología de la Hoja de Pisco Elqui, Región de Coquimbo*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica N° 68

Moscoso, R., Nasi, C. y Salinas, P. (1982). *Geología de la Hoja Vallenar y parte norte de La Serena, regiones de Atacama y Coquimbo*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica N° 55

Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute* 30(1): 25-33

ONEMI (1997). Informes del terremoto de Punitaqui de 1997. Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública



Pardo, M., Comte, D., Monfret, T., Boroschek, R. and Astroza, M. (2002). The October 15, 1997 Punitaqui Earthquake ($M_w = 7.1$): a destructive event within the subducting Nazca plate in central Chile. *Tectonophysics* 345(1): 199-210

Piñones, A.R. (2002). *Efectos del sismo del 14 de octubre de 1997 en la ciudad de Ovalle*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile

Rivano, S. y Sepúlveda, P. (1991). *Geología de la Hoja de Illapel, Región de Coquimbo*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica N° 69

Rosales, G.A. (1988). *Geología del área de Combarbalá – San Lorenzo (31°00' – 31°15' Latitud Sur), Región de Coquimbo*. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile

Ruiz, S., Klein, E., del Campo, F., Rivera, E., Poli, P., Metois, M., Vigny, C., Baez, J.C., Vargas, G., Leyton, F., Madariaga, R. and Fleiout, L. (2016). The seismic sequence of the 16 September 2015 M_w 8.3 Illapel, Chile, Earthquake. *Seismological Research Letters* 87(4): 789-799

Sáez, M.A. (2016). *Correlación cruzada de ruido sísmico para la obtención de perfiles profundos de velocidad de onda de corte en la cuenca de Santiago*. Tesis para optar al grado de Magíster en Ingeniería Sísmica, Universidad de Chile

Thomas, H. (1967). *Geología de la Hoja de Ovalle, Provincia de Coquimbo*. Instituto de Investigaciones Geológicas, Chile. Boletín N°23