

AUMENTO DE INTENSIDADES SEGÚN
LAS CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE
LOS SUELOS DE FUNDACIÓN, SISMO DEL
3 DE MARZO DE 1985

MAXIMILIANO ASTROZA I.*
JOAQUÍN MONGE E.*

RESUMEN

Los grandes terremotos con epicentro frente a las costas del litoral central representan las condiciones epicentrales extremas de diseño en la zona central de Chile, revistiendo su estudio la máxima importancia para la ingeniería sísmica local.

Perteneciendo el sismo del 3 de marzo de 1985 a este grupo de terremotos, se presenta en este trabajo el resultado de un estudio realizado para determinar los efectos de las características geológicas de los suelos de fundación. Este efecto se cuantifica con el aumento observado en el grado de intensidad cuando se comparan las intensidades obtenidas en los pueblos y ciudades ubicados en el área afectada por el sismo del 3 de marzo de 1985 con las isosistas en roca de este evento.

Finalmente se proponen recomendaciones orientadas a restringir el uso de sistemas constructivos de comportamiento frágil en algunos de los depósitos encontrados en la zona.

*Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.

1. INTRODUCCIÓN

El terremoto del 3 de marzo de 1985, de magnitud $M_s = 7.8$, con epicentro en el mar entre Valparaíso y Algarrobo y de características moderadas a fuertes, es el terremoto más destructivo que ha afectado a la zona central de Chile en este siglo, junto con el sismo del 16 de agosto de 1906, de magnitud $M_s = 8.2$ y con epicentro frente a Valparaíso.

Teniendo en cuenta estas características se han realizado estudios comparativos de ambos sismos para obtener recomendaciones de carácter general (1, 2). En particular, en el estudio del sismo del 3 de marzo de 1985, se ha realizado un análisis de las intensidades obtenidas en varias de las localidades ubicadas en el área de daños, estableciéndose los efectos de las características geológicas y geotécnicas de los suelos de fundación en el grado de intensidad (2).

Las intensidades se han calculado con la información de daños disponible, usando la metodología propuesta por Astroza y Monge (3). Los datos del sismo de 1985 se obtuvieron del estudio de los daños realizado en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile por alumnos y profesores del Departamento de Ingeniería Civil en conjunto con profesores del Departamento de Geología y del Instituto de Investigaciones y Ensayes de Materiales, IDIEM. Estos datos se complementan con los datos utilizados en un estudio de la zona de San Antonio y Llole, desarrollado para el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (10).

El total de construcciones encuestadas y el número de localidades o sectores estudiados después del sismo del 3 de marzo de 1985 se detalla en la Tabla 1.

· TABLA 1
SECTORES Y VIVIENDAS ENCUESTADAS

Ciudad o región	Número de sectores o localidades	Número de casas encuestadas				Total
		Adobe	Tabique	Albañilería		
				Simple	Reforzada	
Santiago	288	16.538	—	21.827	8.390	46.755
Valparaíso	25	298	2.582	258	—	3.138
San Antonio*	22	—	—	909	983	1.892
Otros	487	25.373	2.883	1.075	291	29.622
Total	822	42.209	5.465	24.069	9.664	81.407

*Datos del estudio para el MINVU (10).

2. ANTECEDENTES DISPONIBLES
TABLAS DE S.V. MEDVEDEV (5)

Con los resultados de las observaciones de los efectos de sismos en 34 ciudades de la Unión Soviética, Medvedev establece las variaciones del grado de intensidad, medido con la escala M.S.K. (4), debido a las características geológicas y geotécnicas de los suelos de fundación (5). Estas variaciones se resumen en la Tabla 2 y en forma más detallada en la Tabla 3.

TABLA 2
INCREMENTOS DE LA INTENSIDAD SÍSMICA PARA
LAS CATEGORÍAS BÁSICAS DE SUELOS, A PARTIR DE DATOS
MACROSÍSMICOS

Suelo	Incremento de intensidad
— Granito	0
— Calizas y areniscas	0 - 1
— Suelo moderadamente firme	1
— Suelo de fragmentos gruesos (bolones, gravas)	1 - 2
— Suelo arenoso	1 - 2
— Suelo arcilloso	1 - 2
— Relleno suelto	2 - 3

Según Medvedev, el aumento de la intensidad se debe además a la influencia del nivel freático cuando se ubica a menos de 10 m. bajo de la superficie del suelo. La influencia de este nivel se detalla en la Tabla 4, para suelos de tipo: limos, limos arenosos, arena y gravilla.

En función de la información de las Tablas 3 y 4, Medvedev propone una expresión para calcular el aumento de la intensidad en un suelo determinado, incluyendo un término exponencial que agrega el efecto del nivel freático próximo a la superficie.

$$n_i = 1.67 [\log (v_o \rho_o) - \log (v_i \rho_i)] + e^{-0.04h^2}$$

donde:

v_o : velocidad de ondas longitudinales en granito (km/seg)

ρ_o : densidad del granito (g/cm^3)

- v_i : velocidad de ondas longitudinales en suelo i (km/seg)
 ρ_i : densidad del suelo i (g/cm^3)
 h : distancia del nivel freático a la superficie del suelo (m).

Desde el punto de vista práctico, algunas normas sísmicas establecen los niveles de la acción sísmica en función del grado de intensidad (6, 7). En particular la norma sísmica de la Unión Soviética (6) reconoce cuatro zonas sísmicas, caracterizadas por los grados de intensidad VI, VII, VIII y IX, correspondientes a las intensidades del sismo de diseño en suelos moderadamente firmes. De acuerdo con esta norma, en la zona de intensidad VI no se diseña contra sismos y los espectros de diseño para las zonas VII, VIII y IX son proporcionales y sus ordenadas están en la razón 1 : 2 : 4 respectivamente, lo que significa que un aumento de un grado en la intensidad esperada para el terremoto de diseño, duplica el valor del espectro.

En suelos constituidos por granito, la norma de la Unión Soviética recomienda disminuir la intensidad en 1 grado, así una construcción fundada en granito en la zona sísmica VIII podría ser diseñada con el espectro de la zona VII. Análogamente, para suelos de relleno, la intensidad se debe aumentar en 1 ó 2 grados y una construcción ubicada sobre relleno en zona VII debiera diseñarse con el espectro de la zona VIII o tal vez de la zona IX.

3. EFECTO DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE CHILE EN EL GRADO DE INTENSIDAD

Teniendo en cuenta la cantidad de información reunida después del sismo del 3 de marzo de 1985, es importante verificar las recomendaciones de Medvedev para proponer restricciones al uso de sistemas constructivos fundados en estratos superficiales.

Con este propósito se analizan las intensidades obtenidas en este sismo, determinando con ellas las isosistas en roca y el aumento del grado de intensidad respecto a la roca en suelos de origen coluvial, lacustre, fluvial y cenizas volcánicas.

3.1. *Isosistas en roca del sismo del 3 de marzo de 1985*

Para establecer las variaciones que experimenta la intensidad en las distintas unidades respecto de la roca, se trazan las isosistas en roca. El trazado de estas isosistas se hace a partir de las intensidades obtenidas en las

TABLA 3
INCREMENTO DE LA INTENSIDAD PARA DIFERENTES SUELOS

Designación del suelo	v_p (km/seg)	Incremento en unidades de intensidad
I. Suelo firme		
Granitos	5.6	0
Calizas, pizarras, gneis	3.5 - 4.5	0.2 - 0.4
Areniscas (compactas)	2.2 - 3.0	0.5 - 0.8
Areniscas, calizas, pizarras (dislocadas)	1.5 - 2.3	0.7 - 1.1
II. Suelo moderadamente firme		
Yeso	2.4 - 3	0.6 - 0.8
Margas	2.0 - 2.6	0.7 - 1.0
Arenas cementadas	1.4 - 1.9	1.0 - 1.2
III. Suelo de fragmentos gruesos		
Gravilla y bolones	1.1 - 1.6	1.2 - 1.4
Grava de origen cristalino	1.0 - 1.4	1.3 - 1.6
Grava de origen sedimentario	0.7 - 1.2	1.4 - 1.8
IV. Suelo arenoso		
Gravillas y arenas gruesas	1.1 - 1.6	1.2 - 1.4
Arenas de grano mediano	1.0 - 1.4	1.3 - 1.6
Arenas de grano fino	0.7 - 1.2	1.4 - 1.8
V. Suelo arcilloso		
Arcillas	0.9 - 1.5	1.2 - 1.6
Limos	0.8 - 1.4	1.3 - 1.7
Limos arenosos	0.7 - 1.2	1.4 - 1.8
Limos (coeficiente de porosidad $E=1$) y limos arenosos ($E=0.7$)	0.5 - 0.8	1.7 - 2.1
VI. Suelo de relleno y natural		
Suelo de relleno	0.3 - 0.5	2.3 - 2.6
Suelo natural	0.2 - 0.3	2.6 - 3.0
VII. Suelo saturado		
Gravas y gravillas	—	1.6 - 2.0
Suelo arenoso	—	2.0 - 2.4
Suelo arcilloso (limo arenoso, limos)	—	2.4 - 2.8
Suelo de relleno y natural	—	3.3 - 3.9

TABLA 4
 VARIACIONES DE LA INTENSIDAD SÍSMICA CON LA DISTANCIA
 DEL NIVEL FREÁTICO A LA SUPERFICIE DEL SUELO

Distancia del nivel freático a la superficie del suelo, en (m)	Variación de la intensidad, en unidades de intensidad
0 - 1.0	1.0
4	0.5
10	0.

localidades o sectores de ciudades construidos sobre esta unidad, los que se ubican de preferencia en la costa y en la precordillera de los Andes.

Teniendo en cuenta que los datos en roca son escasos se recurre a las intensidades obtenidas en localidades fundadas en depósitos de grava densa, las que se corrigen considerando las variaciones recomendadas por Medvedev, las intensidades de las localidades ubicadas en roca y que las isosistas en roca deben ser curvas suaves al no incluir los efectos locales.

En la Figura 1 se muestran las isosistas en roca que separan las áreas de intensidades 7.5, 7.0, 6.5 y 6.0. Estas curvas han sido trazadas con 23 datos en roca y 33 datos en depósitos de grava, identificando la zona de mayor concentración de datos a través de un trazado continuo de las curvas.

De la figura se observa que la isosista que separa las intensidades 7.5. y 7.0 sigue el borde del área de réplica (8) y la isosista que separa las intensidades 6.5. y 6.0 sigue aproximadamente el trazado de la carretera Panamericana en la zona de la Depresión Central.

3.2. Aumento de la intensidad respecto de la roca en suelos de origen coluvial, lacustre, fluvial y cenizas pumicíticas

La información disponible sólo permite hacer una clasificación de los suelos de fundación de acuerdo con su origen. La clasificación utilizada es la propuesta por J. Varela (9) la que incluye rocas fundamentales y depósitos de rellenos cuaternarios.

Los depósitos de rellenos cuaternarios más importantes en la zona son:

- i) *Depósitos de cenizas pumicíticas.* Estos depósitos cineríticos subyacen discordantemente a los depósitos de abanicos aluvionales, emergien-

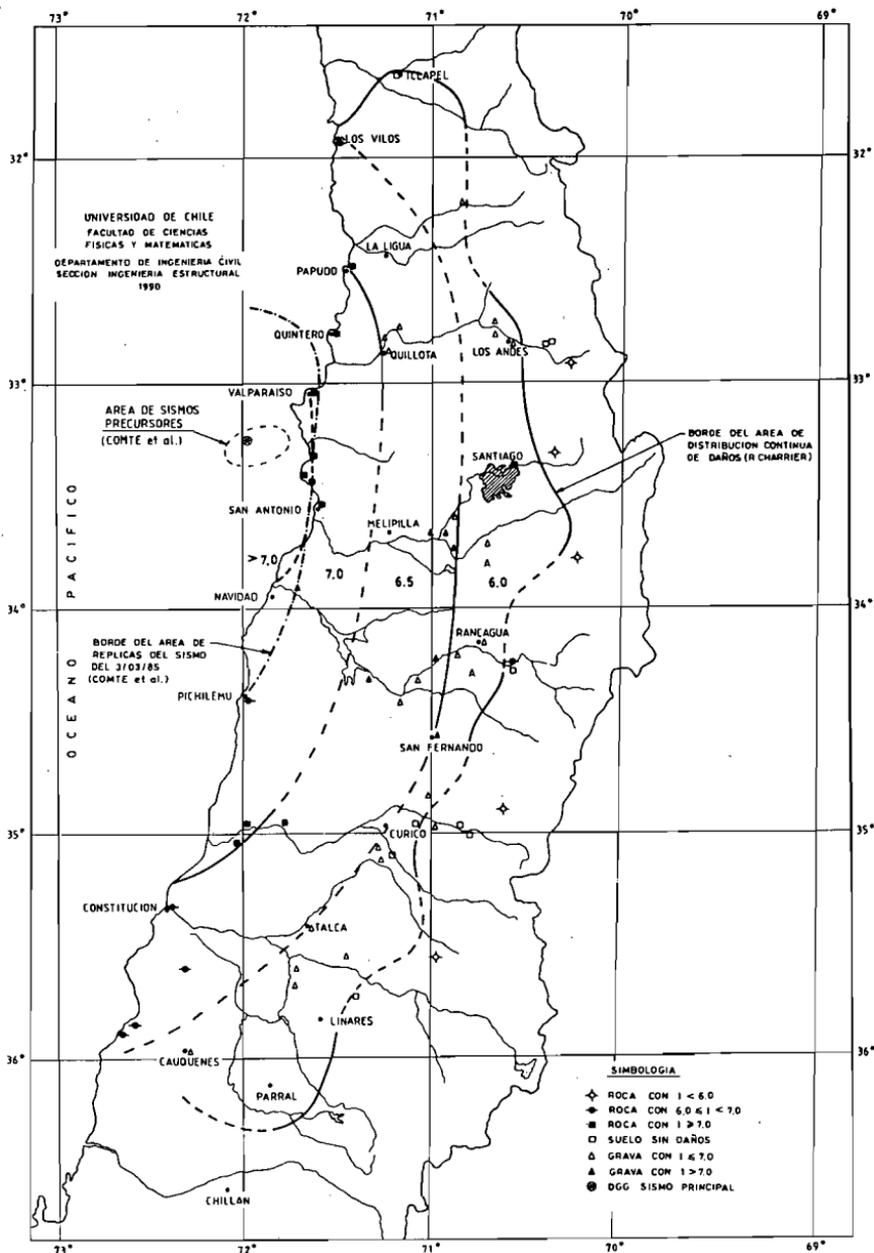


Figura 1. Isosistas en roca. Sismo del 3 de marzo de 1985.

do en parte sobre ellos y desarrollando una morfología típica de cerrillos (lomas suaves).

Esta unidad está constituida por depósitos de cenizas riolíticas con inclusiones de piedras pómez con bajo porcentaje de fragmentos de roca; presenta grados variables de cementación, de leve a alto.

- ii) *Depósitos de abanicos aluvionales*. Esta unidad está constituida por gruesas acumulaciones de depósitos fluviales y torrenciales aluvionales representados por rípios, gravas arenosas y arenas con algunas intercalaciones de materiales de corrientes de barro y avalanchas volcánicas. Estos depósitos desarrollan extensas acumulaciones en forma de abanico en el área de la desembocadura de los ríos y esteros principales en la Depresión Central.
- iii) *Depósitos fluviales*. Esta unidad está constituida por depósitos de arenas con gravas arenosas con algunos niveles intercalados de depósitos diamícticos correspondientes a coladas de barro que se disponen en el curso y márgenes de los principales ríos de la zona. En el área costera esta unidad incluye además depósitos arenosos de dunas y de alta playa.

Esta unidad se subdivide en: depósitos fluviales actuales, los que se disponen en el cauce mismo de los ríos extendiéndose hasta el área máxima de inundación correspondiente a los períodos de crecidas. Depósitos fluviales subactuales que constituyen terrazas bajas situadas a ambos lados de los cursos principales y que quedan fuera del alcance de las crecidas. Depósitos fluviales antiguos que integran terrazas de alturas entre 5 y 50 metros sobre el nivel del río.

- iv) *Depósitos coluviales y de conos de deyección*. Esta unidad está integrada por depósitos diamícticos que dan lugar a conos de pendiente relativamente fuerte, 15 a 30 grados, al pie de la mayor parte de los relieves de la zona. Estos depósitos están constituidos, por lo general, por clastos de forma angulosa de tamaños variados, englobados en matrices limoarcillosas predominantes que constituyen gruesas depositaciones de estratificaciones heterogéneas.
- v) *Depósitos lacustres*. Esta unidad está constituida por sedimentos finos tipo limos y arcillas con estratificación laminada o masiva, los cuales ocupan cuencas que tienen un drenaje obstruido o restringido.

Las intensidades obtenidas en las distintas unidades se detallan en la Tabla 5 y se muestran en las Figuras 2, 3, 4, 5 y 6. Al comparar estas intensidades con las isosistas en roca se concluye:

TABLA 5
INTENSIDADES DEL SISMO DEL 3 DE MARZO DE 1985 SEGÚN
LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS DEPÓSITOS DONDE SE UBICA
LA LOCALIDAD

Tipo de depósito o unidad	Localidad o sector	Grado de intensidad M.S.K.
Roca	Illapel	5.5
	Los Vilos	6.25
	Papudo	7.0
	Quintero	7.0
	Valparaíso	7.5
	Algarrobo	7.0
	El Quisco	7.5
	El Tabo	7.5
	Cartagena	7.0
	Pichilemu	6.5
	Licantén	7.0
	Hualañé	6.5
	Curepto	7.0
	Constitución	6.5
	Empedrado	6.5
	Pelluhue	6.5
	Curanipe	6.5
	Vilches Bajo	5.0
	Sierras de Bellavista	5.0
	Coya	6.25
San Gabriel	5.0	
Farellones	5.0	
Río Blanco	5.0	
Cenizas pumiciticas	Maipú	7.5
	Pudahuel	7.5
	Cerrillos	7.5
	Lo Prado	7.5
	María Pinto	8.5
	Bollenar	8.5
	Melipilla	8.5
	Carmen Bajo	9.5
	El Pabellón	9.5
	Codigua	8.5
	Carmen de Codigua	9.5
	La Viluma	9.5
	Mandinga	8.5
	Cholqui	9.75
	Itahue	7.5
	Camarico	7.5
Cumpeo	7.5	

(continuación Tabla 5)

Tipo de depósito o unidad	Localidad o sector	Grado de intensidad M.S.K.
Grava	Talca	7.5
	Pencahue	6.5
	Petorca	7.0
	San Felipe	7.0
	Los Andes	6.5
	Calera	7.0
	La Cruz	7.0
	Quillota	7.0
	Santiago	7.0
	Peñaflor	7.0
	Talagante	7.5
	El Monte	7.5
	Isla de Maipo	7.5
	Buín	7.0
	Paine	7.0
	Rapel	7.5
	Lo Miranda	6.5
	Rancagua	6.5
	Doñihue	7.5
	Las Ábras	7.5
	Requinoa	6.5
	Coltauco	7.0
	Peumo	7.0
	San Fernando	7.5
	Morza	7.0
	La Laguna	7.0
	Curicó	7.0
	Lontué	7.0
	Molina	7.0
	Talca	7.0
San Clemente	6.5	
San Javier	7.0	
Villa Alegre	7.0	
Cauquenes	6.5	
Coluviales	La Ligua	7.5
	Til-Til	7.0
	Batuco	7.0
	Los Capachos	8.5
	Las Condes	6.0
	La Reina	6.5
	Peñalolén	7.0
	La Florida	7.0
	Sta. Victoria de Mallarauco	8.0
	Pomaire	8.5

(continuación Tabla 5)

Tipo de depósito o unidad	Localidad o sector	Grado de intensidad M.S.K.
	Puangue	8.0
	Cuncumén	8.0
	Carmen de las Rosas	9.0
	Rangue	8.0
	San Francisco de Aculeo	8.0
	Alhué	9.5
	Villa Alhué	8.5
	Las Balsas	7.5
	El Durazno	8.0
	Parral de Purén	7.0
	Pataguas (orilla)	7.0
	La Esperanza	7.0
	El Toco	7.0
	San Roberto	7.0
	Calleuque	8.5
	Puguillay	8.0
	Coya	6.5
	Termas de Cauquenes	5.0
Lacustres	Llayllay	7.5
	Huertos Familiares	8.0
	Panquehue	8.5
	Villa de Covil	9.0
	Cartagena	8.5
	Santa Inés	7.5
	Cuchipuy	9.5
	San José de las Pataguas	8.5
	Millahue	9.5

- i) Los depósitos de grava presentan un aumento de la intensidad entre 0.5 y 1.0 grado.
- ii) En general los depósitos coluviales presentan un aumento de la intensidad entre 1 y 2 grados.
- iii) Los depósitos de cenizas pumicíticas presentan un aumento de la intensidad entre 1.5 y 2.5 grados.
- iv) Los depósitos lacustres presentan un aumento de la intensidad entre 2 y 2.5 grados.

En los depósitos de origen fluvial no es posible establecer un valor del aumento de la intensidad, con excepción de los depósitos de grava, por la heterogeneidad que los caracteriza. Heterogeneidad derivada del hecho

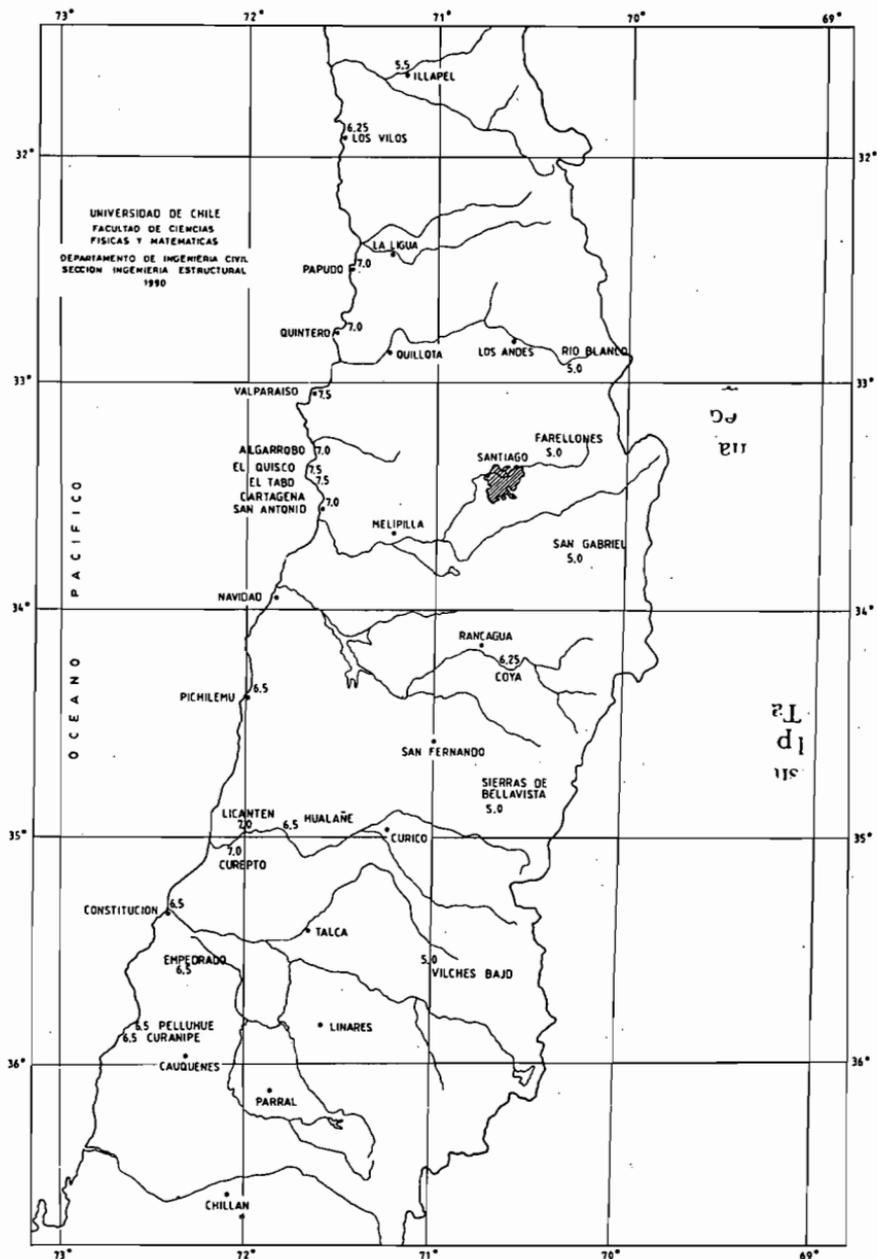


Figura 2. Intensidades MSK para localidades ubicadas en roca. Sismo del 3/03/1985.

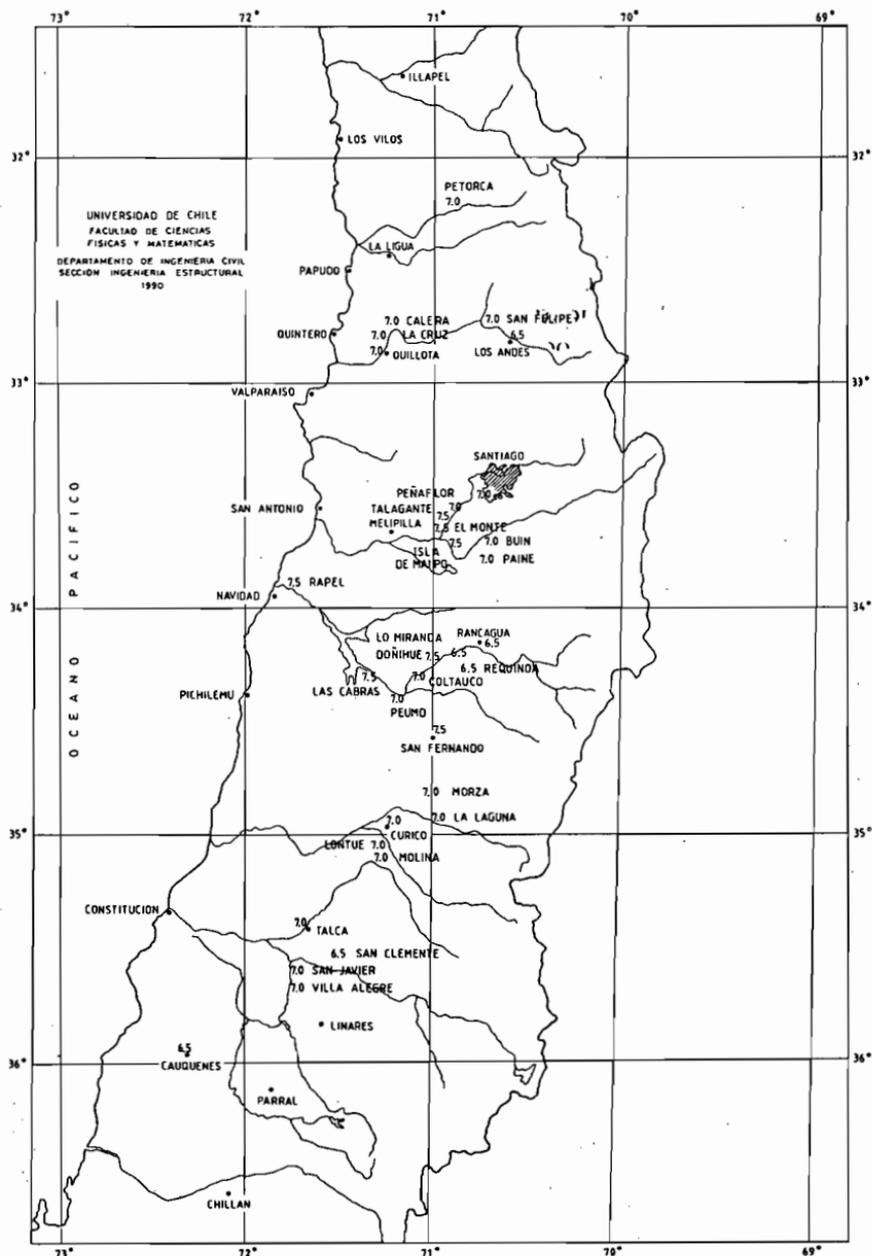


Figura 4. Intensidades MSK para localidades ubicadas en depósitos de grava. Sismo del 3/03/1985.

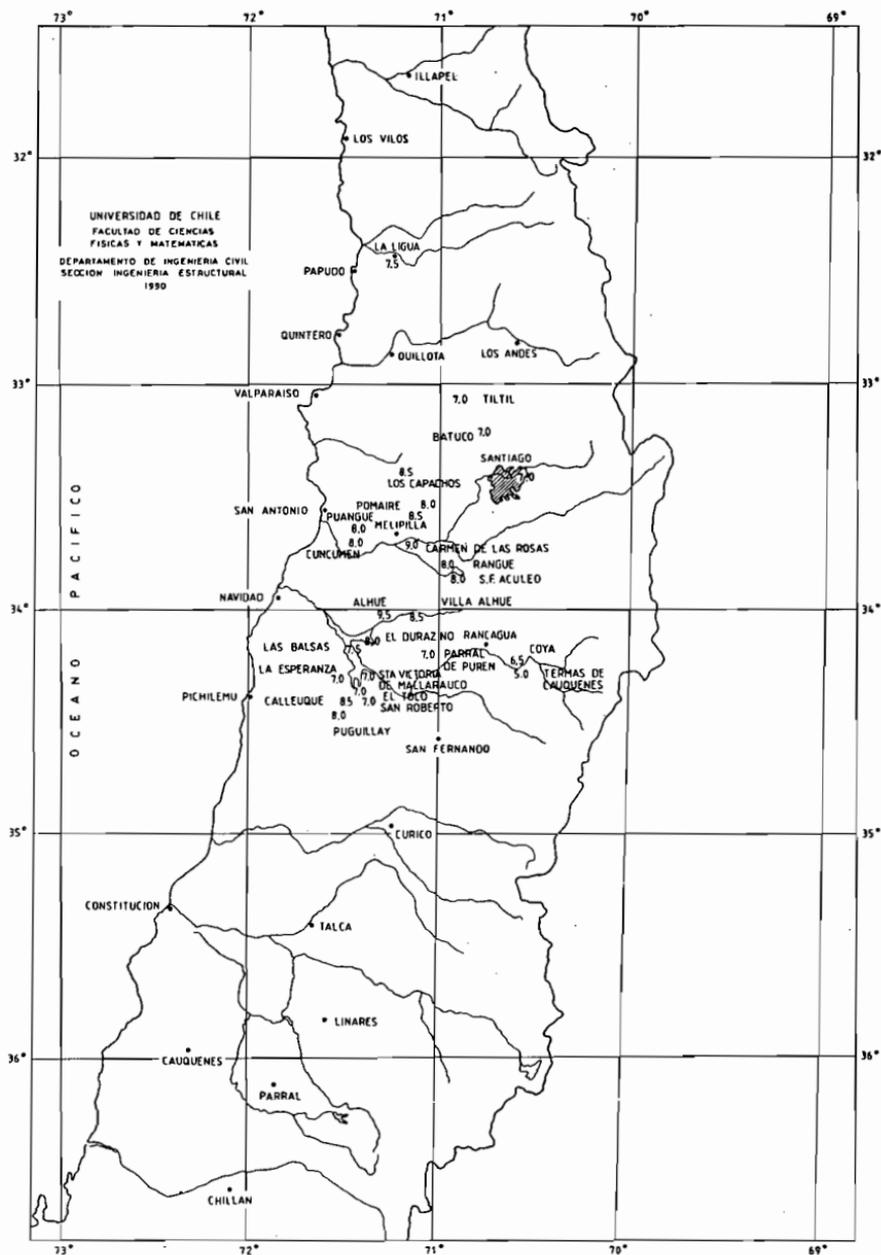


Figura 5. Intensidades MSK para localidades ubicadas en depósitos coluviales. Sismo del 3/03/1985.

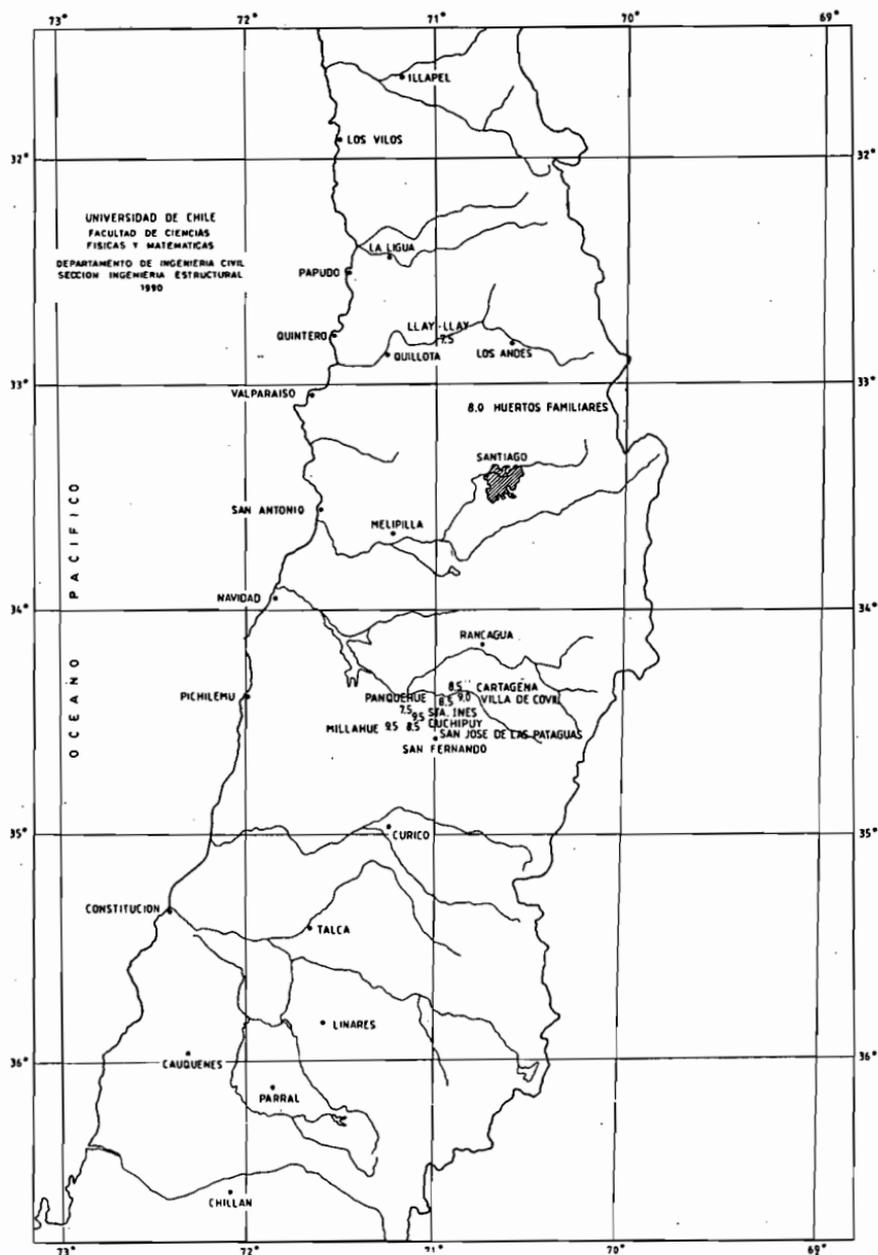


Figura 6. Intensidades MSK para localidades ubicadas en depósitos lacustres. Sismo del 3/03/1985.

que estos depósitos incluyen fluviales actuales, subactuales y antiguos, de abanicos y aluvionales, los que muestran un comportamiento sísmico diferente derivado de su composición (finos, arenas, gravas) y de su compacidad o consistencia.

4. COMENTARIOS

Los aumentos del grado de intensidad que se producen por efecto de las características de los depósitos sobre los que se ha construido en la zona afectada por el sismo del 3 de marzo de 1985, son del mismo orden de magnitud de los observados por Medvedev en suelos de propiedades comparables.

Teniendo en cuenta el grado de daño que se produce para los distintos grados de intensidad y el porcentaje de viviendas que lo presentan (3), las variaciones observadas en el grado de intensidad son suficientes para impedir el uso de sistemas constructivos de comportamiento frágil en depósitos coluviales, de cenizas pumicíticas y lacustres. En particular no es aconsejable la construcción de viviendas de adobe y de albañilería sin refuerzos, y así los daños no superarán los porcentajes de zonas con suelos de mejores características sísmicas.

Finalmente es importante destacar que para determinar las variaciones del grado de intensidad por efecto de las características geológicas de los suelos de fundación, a partir de los daños producidos por un sismo, es necesario que se produzca un sismo con las características del sismo del 3 de marzo de 1985. La experiencia local ha demostrado que sismos de menor magnitud en la región no han producido un nivel de daño como para determinar las variaciones del grado de intensidad por efecto de las condiciones locales.

5. RECONOCIMIENTOS

Este estudio es parte del proyecto que ha sido desarrollado con aporte financiero del Departamento de Ingeniería Civil, del Departamento Técnico de Investigación de la Universidad de Chile en el proyecto I 1741-8755 de 1987, del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico en los proyectos 1272 de 1986 y 1199 de 1988, de la American Association for the Advancement of Science y de los doctores Edgar Kausel y Ted Algermissen en un Grant de U.S. Geological Service.

En este proyecto han colaborado los profesores: José Corvalán D., Hugo Moreno R., Juan Varela B., Manuel Araneda C. y Pedro Acevedo

M. y los alumnos del Departamento de Ingeniería Civil: Juan Arancibia G., Alessandro Casaliggi B., Jorge Cholaky C., Miguel A. Durán M., Emiliano Eberl L., Paricio Elicer A., Fernando García B., José Hernández El Salug, Luis Levrini A., Andrés Lira B., Luciano Richetti F., Mario Risso A., J.C. Canales P., Carlos Perretta C., José García S., Jorge Infantas L., Hugo Arancibia, Fernando Legues A., Mario Rojas B., Walter Sunkel M., Juan Quiroz M., Aldo Ballochi H., Patricio Bertholet, Richard Fajardo I., Carlos Sepúlveda S., Hernán Silva B., Pedro González W., Tito Salazar M., Ingrid Derpsch G., Eduardo Vial V., Patricia Barrientos R., José M. Cancino M., Jorge Marza D., Ricardo Pellicer B., Valentín Ovalle C., Carlos Pantoja H., Rodrigo Jiménez P., Alex Biskupovic, Ximena Salinas B., Sara Uribe M. y Pilar Menéndez G.

REFERENCIAS

1. ÁLVARO CARVAJAL S. *Estudio Comparativo de los Terremotos de Valparaíso de 1906 y 3 de marzo de 1985*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, 1989.
2. PILAR MENÉNDEZ G. *Atenuación de las intensidades del Sismo del 3/3/85 en Función de la Distancia a la Zona de Reptura y del Tipo de Suelo*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, 1991.
3. J. MONGE y M. ASTROZA. *Metodología para determinar el Grado de Intensidad a partir de los Daños*. 5^{as} Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Santiago, Chile, 7-11 agosto 1989, Vol. 1, pp. 483-492.
4. S. MEDVEDEV, W. SPONHEUR, V. KÁRNIK. *Neue Seismische Skale*. Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Heft 77, Akademie Verlag, 1964.
5. S. MEDVEDEV. *Engineering Seismology*. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalén, 1965. U.S. Department of Commerce, Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information, Springfield, Va. 22151.
6. Union of Soviet Socialist Republics. *Standards and Regulations for Construction, Part 2, Chapter 7: Construction in Seismically Active Regions*. Earthquake Resistant Regulations. A World List-1988. Compiled by International Association for Earthquake Engineering. Tokio, Japón, July 1988.
7. Yugoslavia. *Code of Technical Regulations for the Design and Construction of Building in Seismic Regions-1982*. Earthquake Resistant Regulations. A World List-1988. Compiled by International Association for Earthquake Engineering, Tokio, Japón, July 1988.
8. E. KAUSEL V. *Proceso sísmico, parámetros focales y réplicas del sismo del 3 de marzo,*

1985. El sismo del 3 de marzo 1985 - Chile, Cap., 2. Ed. Acero Comercial S.A., 2ª edición, septiembre, 1986.
9. M. ASTROZA, J. MONGE, J. VARELA. *Zonificación sísmica de la Región Metropolitana*. 5^{as} Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Santiago, Chile, 7-11 agosto de 1989, Vol. 1, pp. 493-503.
 10. Geotécnica Consultores Ltda. *Análisis de Microzonificación Sísmica de San Antonio*. Solicitado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Santiago, septiembre de 1988.