

VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICIOS RESIDENCIALES Y PRONÓSTICO DE DAÑOS EN CASO DE SISMOS FUERTES EN LA CIUDAD DE COLIMA

Vyacheslav M. Zobin¹ y J. Francisco Ventura-Ramírez²

¹ Observatorio Vulcanológico, Universidad de Colima, Colima, Col., 28045, México
E-mail: vzobin@cgc.ucol.mx

² Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de Colima, Coquimatlan, Col., 28000, México

RESUMEN

La ciudad de Colima, capital del estado de Colima, México, está ubicada en una zona de alto riesgo sísmico. La zona de subducción de la Trinchera Mesoamericana y el sistema de fallas tectónicas locales pueden producir terremotos fuertes con intensidad hasta de IX en Colima. El objetivo de nuestro artículo es estudiar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones residenciales de la ciudad de Colima y construir las matrices de daños esperados para el pronóstico de los efectos de terremotos de intensidad de VI a IX (escala Mercalli Modificada, MM). El inventario preliminar de 150 edificaciones de la zona de estudio, en conjunto con datos de desarrollo urbano de la ciudad, nos permite dividirla en tres subzonas: subzona I (antigua, construida antes de 1950), subzona II (intermedia, construida en los años 1950 a 1970) y subzona III (moderna, construida después de 1970). Los resultados de cálculos de probabilidades de daños durante terremotos de intensidad VI a IX, para cada subzona, muestran que tres categorías de daños (fuertes, mayores y totales) son los más peligrosos para la vida de la ciudad. El temblor de intensidad VI prácticamente no va a producir daños significativos. El terremoto de intensidad VII puede ser dañino en la subzona I (11% de daños mayores y 39% de daños fuertes) y bastante sensible (18% de daños fuertes) en la subzona II. El terremoto de intensidad VIII representa real peligro de destrucción de la mitad de las edificaciones en la subzona I (9% de destrucciones totales y 49% de daños mayores), puede ser dañino (25% de daños mayores y 40% de daños fuertes) para edificaciones de la subzona II y bastante sensible en la subzona III (6% de daños mayores y 33% de daños fuertes). El terremoto de intensidad IX puede destruir la mayoría de edificaciones de las subzonas I y II y la mitad de edificaciones en la subzona III.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Colima, capital del estado de Colima, México, está ubicada en una zona de alto riesgo sísmico (Figura 1). La zona de subducción de la Trinchera Mesoamericana y el sistema de fallas tectónicas locales pueden producir terremotos fuertes con intensidad hasta de IX en Colima (Singh *et al.*, 1985; García Acosta y Suárez Reynoso, 1996). Durante este siglo, debido a los terremotos del 20 de enero de 1900, del 3 y 18 de junio de 1932, y del 15 de abril de 1941, originados en la zona de subducción, se produjeron efectos destructivos en la ciudad.

El objetivo de este artículo es presentar un estudio de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones residenciales de la ciudad de Colima y construir las matrices de daños esperados para el pronóstico de los efectos de terremotos de intensidad de VI a IX (escala Mercalli Modificada, MM). El método de aplicación de matrices de daños para pronóstico de efectos destructivos de estructuras es popular en las investigaciones de riesgo sísmico y microzonificación (Soares López y Acosta Chang, 1998; Whitman, 1988), pero aún no han sido construidas matrices de vulnerabilidad para Colima.

METODOLOGÍA Y DATOS

La vulnerabilidad sísmica es el valor probabilístico de daño en la estructura para cada una de las intensidades posibles del movimiento del terreno (Caicedo *et al.*, 1996). La metodología del estudio de vulnerabilidad sísmica consta de tres etapas: (1) clasificación de las edificaciones, (2) inventario de las edificaciones, y (3) construcción de matrices de probabilidad de daños producidos con un terremoto (Whitman, 1988).

La ciudad de Colima es una ciudad típica de la parte central de México. Sus edificios residenciales son en su mayoría construcciones de uno o dos pisos. Por eso, la clasificación de mampostería es simple y tiene los tres grados: tipo A (buena calidad), tipo B (calidad intermedia) y tipo C (mala calidad) (Tabla 1). El estudio de efectos macrosísmicos del terremoto del 9 de octubre de 1995 (Mw 8.0), que ocurrió a distancia epicentral de 100 Km y fue sentido en la ciudad con la intensidad de IV a VI, mostró la dependencia de la intensidad observada contra el tipo de mampostería en Colima: para las edificaciones tipo A la intensidad promedio fue de 0.5 grados menos que para edificaciones tipo B y de 1.0 grados menos que para edificaciones tipo C (Zobin y Ventura-Ramírez, 1998).

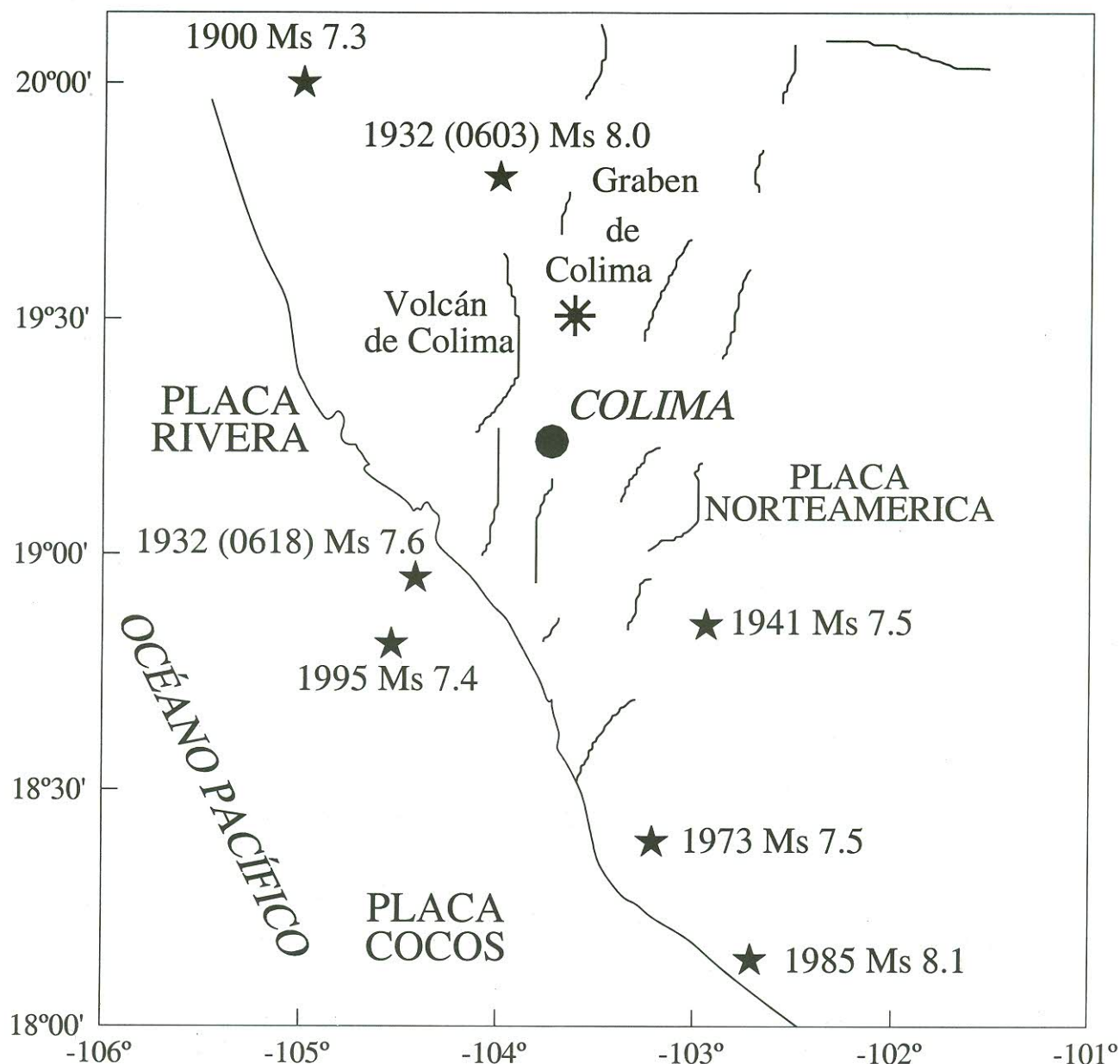


Figura 1. Situación sismotectónica en los alrededores de la ciudad de Colima. Las estrellas muestran los epicentros de los terremotos más grandes del siglo, con los datos y las magnitudes. Los epicentros y las magnitudes provienen del catálogo de Pacheco y Sykes (1992). Se muestra también (con el sistema de líneas) la zona de las fallas del Graben de Colima.

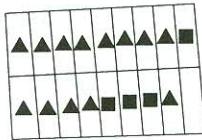
Tabla 1. Mampostería de edificaciones en Colima (Por Jesús Ríos Aguilar, Carlos Hugo Gutiérrez Lozano, Roberto Ríos Flores, Antonio Moreno Trujillo)

Tipo	Descripción
A	<i>Buena calidad:</i> Cimientos de mampostería de piedra con un mínimo de 70 cm de ancho en la base, para terreno regular a bueno con cadenas o dalas de concreto armado de 15 cm de ancho por 20 cm de alto, con castillos separados de 2.5 a 3 m como máximo, losa de 10 cm como mínimo de espesor de concreto armado, muros de 15 cm de espesor como mínimo, comúnmente con dos niveles de construcción.
B	<i>Media calidad:</i> Edificios reforzados construidos con diseños deficientes, materiales de media a buena calidad, comúnmente con muros de tabique de 15 cm, techos de concreto elaborados con control deficiente en la supervisión y regular aplicación de los materiales utilizados, tanto en los refuerzos como en los cementantes.
C	<i>Mala calidad:</i> Construcciones viejas construidas con adobe, construcciones recientes con bastante deficiencia en su calidad, así como carentes de elementos estructurales como castillos, ó dalas de cerramientos, con cubiertas de teja o láminas sin anclajes considerables.

154

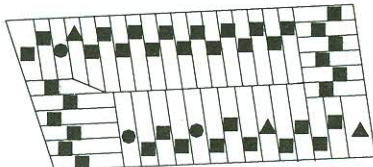
MANZANA TIPO, SUBZONA III

A 13 B 4 C 0



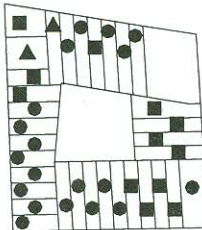
MANZANA TIPO, SUBZONA II

A 3 B 38 C 3



MANZANA TIPO, SUBZONA I

A 2 B 12 C 19



- ▲ MAMPOSTERÍA TIPO A
- MAMPOSTERÍA TIPO B
- MAMPOSTERÍA TIPO C

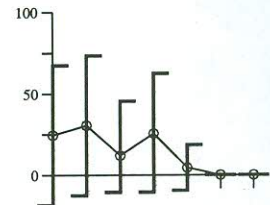
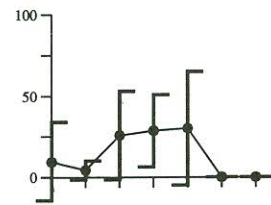
Figura 4. La distribución de mampostería de tres tipos dentro de cada manzana típica. El número de cada tipo de mampostería dentro de cada manzana está escrito cerca de cada manzana.

La Tabla 4 presenta los resultados de los cálculos de probabilidad de daños durante terremotos que producen intensidades VI a IX en Colima, para cada subzona. Tres categorías de daños (fuertes, mayores y totales) son las más peligrosas para la vida de la ciudad. Se puede apreciar que la intensidad VI prácticamente no va a producir daños significativos. La intensidad VII puede ser dañina en la subzona I (11% de daños mayores y 41% de daños fuertes) y bastante sensible (18% de daños fuertes) en la subzona II. El terremoto de intensidad VIII presenta real peligro de destrucción de la mitad de edificaciones en la subzona I (9%

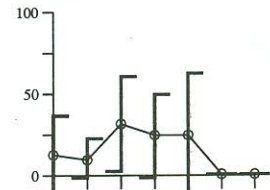
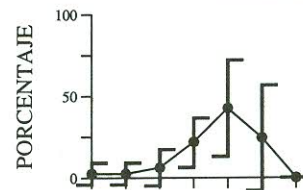
INTENSIDAD VIII

INTENSIDAD VII

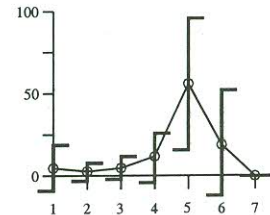
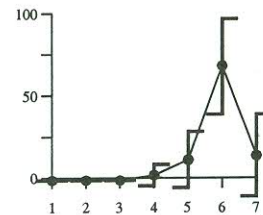
MAMPOSTERÍA TIPO A



MAMPOSTERÍA TIPO B



MAMPOSTERÍA TIPO C



ESTADO DE DAÑOS

1 NINGUNO 2 MENOR 3 LIGERO 4 MODERADO
5 FUERTE 6 MAYOR 7 TOTAL

Figura 5. Desviación estándar de las probabilidades de daños pronosticadas con el método de expertos, para tres tipos de mampostería, e intensidades MM VII y VIII.

de destrucciones totales y 49% de daños mayores), puede ser dañina (25% de daños mayores y 40% de daños fuertes) para edificaciones de la subzona II y bastante sensible en la subzona III (6% de daños mayores y 33% de daños fuertes). La intensidad IX puede destruir la mayoría de edificaciones de las subzonas I y II y la mitad de edificaciones de la subzona III.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El pronóstico de daños está basado en las observaciones visuales del tipo de mampostería y las matrices de probabilidad

Tabla 2. Clasificación del estado de daños (Según Whitman, 1988)

Estado de daño	Factor central de daño (%)	Descripción
Ninguno	0	Sin daño.
Menor	0.5	Daño que no necesita reparación.
Ligero	5	Daños que requieren de una reparación simple.
Moderado	20	Daños que requieren de una reparación importante.
Fuertes	45	Daños que requieren de una reparación costosa.
Mayores	80	Daños que requieren de un estudio de demolición y/o reparación.
Totales	100	Destrucción total de la mayoría de los elementos.

Nota: Factor central de daño es un costo promedio del daño expresado en porcentaje de costo actual.

La ciudad de Colima es un ejemplo de ciudad desarrollada como los anillos de árbol: la zona más antigua constituye el centro de la ciudad, las zonas más modernas están ubicadas en la periferia. Para el inventario de la mampostería de la ciudad fue elegida una zona que constituye aproximadamente el 20% del área residencial y representa todas las etapas de desarrollo urbano de ésta (Figura 2). El inventario preliminar de 150 edificaciones de la zona de estudio, en conjunto con datos de desarrollo urbano, nos permite dividirla en tres subzonas (Figura 3): subzona I (antigua, construida antes de 1950), subzona II (intermedia, construida en los años 1950 a 1970) y subzona III (moderna, construida después de 1970). Dentro cada subzona se realizó el inventario completo para una manzana típica (Figuras 3 y 4). La selección de la manzana típica fue producida de acuerdo con datos estadísticos de la distribución comparativa de las edificaciones de tipos diferentes en cada subzona de la ciudad. Los valores de daños probables fueron calculados para todas las edificaciones de las manzanas y después generalizados para las subzonas y toda la zona.

LA CONSTRUCCIÓN DE MATRICES DE DAÑOS

Las matrices de daños, o funciones de la vulnerabilidad, caracterizan las probabilidades de daños esperados para cada tipo de mampostería durante el terremoto, en función de su intensidad. Para la construcción de las matrices se usó el método de grupo de expertos. Ocho expertos colimenses con gran experiencia de trabajo en ingeniería sísmica (de 6 a 22 años) respondieron los cuestionarios sobre probabilidades de daños para tres tipos de mampostería afectados por terremotos de intensidades MM de VI a IX. Estos cuestionarios fueron preparados para los siete grados de daños (Tabla 2). Después de un estudio estadístico, los valores promedios de probabilidades asociadas a cada grado de daño, para todos los tipos de mampostería considerados, y las intensidades MM de VI a IX, constituyen la matriz de daños probables (Tabla 3). La Figura 5 muestra la desviación estándar de los valores individuales para las intensidades VII y VIII.

PRONÓSTICO DE DAÑOS EN LA CIUDAD DE COLIMA

La Tabla 3 es la básica para el pronóstico de daños para edificaciones colimenses. Para el cálculo de daños probables en cada subzona, podemos usar el siguiente procedimiento. Construimos las fórmulas:

$$P = k(A)p(A) + k(B)p(B) + k(C)p(C);$$

$$k(A) = N(A) / N(A+B+C);$$

$$k(B) = N(B) / N(A+B+C);$$

$$k(C) = N(C) / N(A+B+C).$$

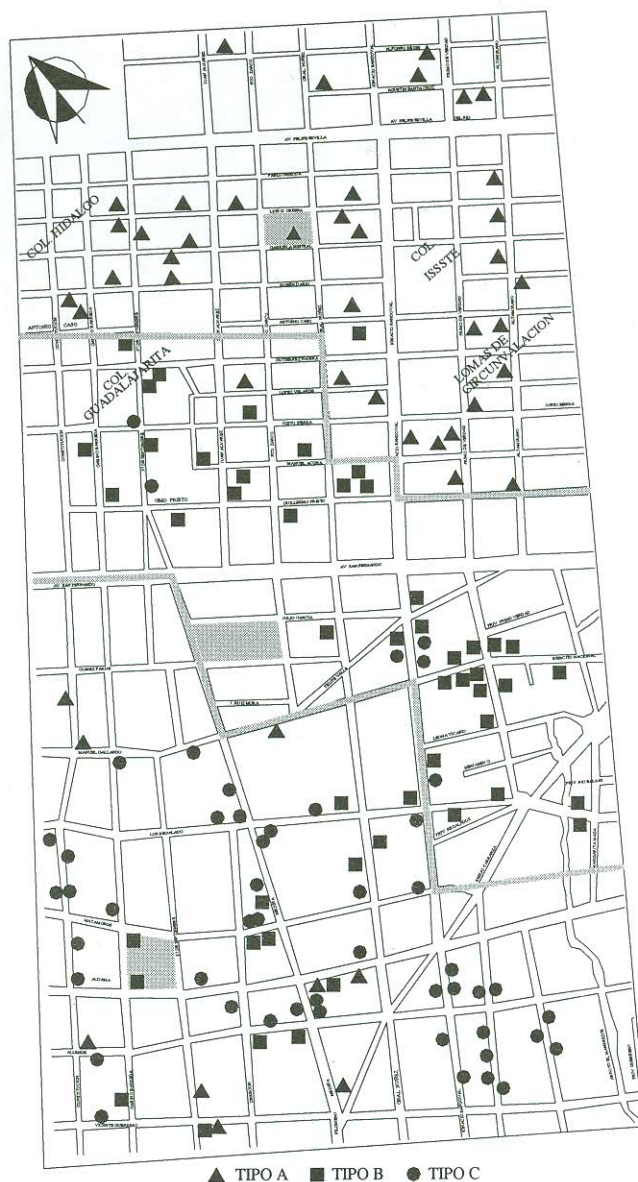


Figura 3. La distribución de los tres tipos de mampostería (A, B y C) dentro de la zona de estudio. Las fronteras entre las tres subzonas se muestran con líneas grises continuas. Tres manzanas típicas se muestran con áreas de sombra. La flecha en la parte izquierda de la figura indica la dirección al norte.

Donde P es la probabilidad del estado de daños para una intensidad MM y un estado de daños de la Tabla 2, $p(A, B, C)$ es la probabilidad del estado de daños de la mampostería tipo A, B o C para esa intensidad de la Tabla 3; y $k(A, B, C)$ es el coeficiente de peso para cada tipo de mampostería en una manzana típica con el número de edificaciones $N(A+B+C)$ de mampostería tipo A, B, y C.

Entonces, con cálculos según esas ecuaciones, para el terremoto que produce una intensidad VII en la manzana típica de la subzona I, donde de las 33 edificaciones tenemos 2 de tipo A, 12 de tipo B y 19 de tipo C, podemos estimar que la probabilidad de los daños fuertes es de 41% y la de daños mayores de 11%.

Tabla 3. Matriz de probabilidad de daños (en %) para tres tipos de mampostería e Intensidades MM VI a IX

Estado de daños	Tipo A				Tipo B				Tipo C			
	VI	VII	VIII	IX	VI	VII	VIII	IX	VI	VII	VIII	IX
Ninguno	65	25	9	6	33	12	3	0	13	5	0	0
Menor	7	31	9	3	32	9	3	1	20	3	0	0
Ligero	22	13	31	2	20	31	5	4	10	5	0	0
Moderado	6	26	25	11	15	24	22	7	34	12	3	0
Fuerte	0	5	26	29	0	24	43	20	23	56	13	0
Mayor	0	0	0	49	0	0	24	59	0	19	69	43
Total	0	0	0	1	0	0	0	9	0	0	15	57

Tabla 4. Pronóstico de daños de edificaciones residenciales en la ciudad de Colima (en %) para intensidades MM de VI a IX en las subzonas I, II y III

Estado de daños	VI			VII			VIII			IX		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Ninguno	24	34	57	8	11	22	1	2	7	0	0	5
Menor	24	29	13	6	9	24	2	3	5	1	1	3
Ligero	18	20	22	16	31	18	4	8	22	2	4	2
Moderado	25	16	8	11	24	26	11	21	27	3	7	15
Fuerte	9	1	0	41	18	10	24	40	33	9	19	24
Mayor	0	0	0	0	11	1	49	25	6	49	57	49
Total	0	0	0	0	0	0	9	1	0	36	12	2

de daños preparadas con grupo de expertos. Los criterios más importantes para la estimación del tipo de mampostería con observaciones visuales fueron muy simples: la calidad de materiales, el diseño y la edad de las casas. Estos criterios son suficientes para trabajar con la Tabla 1.

Los errores en la estimación del tipo de mampostería dependen mucho de los errores individuales de cada investigador. Por eso, es mejor usar las observaciones de la misma persona. El estudio de las intensidades del terremoto del 9 de octubre de 1995 en la ciudad de Colima (Zobin y Ventura-Ramírez, 1998) mostró que se puede esperar un error en la clasificación de edificaciones de aproximadamente 5-10%.

El grupo de expertos preparó los valores de probabilidades de daño con una diferencia en juicio más significativa. Este efecto es normal para trabajo de expertos (ver, por ejemplo, Figura 6 en Whitman, 1988). Ellos pueden determinar claramente el grupo de daños más probables, pero sus opiniones sobre la probabilidad del estado de daño más probable puede ser diferente. La Figura 5 ilustra que la mayor diferencia en sus opiniones se presenta para los estados de daño más decisivos. Para los efectos de la intensidad VIII podemos ver que en el caso de mampostería tipo A la diferencia mayor se produce para el pronóstico de daños con mayor probabilidad: ligeros, moderados y fuertes. Para mampostería tipo B tenemos la misma situación: la diferencia mayor para estados de daños con probabilidad máxima: fuertes y mayores. Lo mismo para la mampostería tipo C: la mayor diferencia en opiniones del valor de probabilidad de daño la tenemos para daños mayores, más probables.

La comparación de las matrices de daños, construidos para la mampostería de la ciudad de Colima, con las matrices calibradas normativas para el estado de California, EE.UU. (ATM-13, 1985), muestra que nuestras curvas de la distribución de la probabilidad de daño (ver la Figura 5) no son bastante monotónicas con la variación del estado de daño. Probablemente ello es resultado del número bajo de expertos, por un lado, y de la heterogeneidad de las edificaciones dentro de cada uno de los tres tipos de mampostería, por otro lado. Además, la clasificación más detallada en las condiciones de la ciudad de Colima, no va a mejorar significativamente el estudio.

Nuestro pronóstico de daños para la ciudad de Colima se puede comparar con observaciones de efectos destructivos de los terremotos previos. Las descripciones de los eventos de 1932 (efectos conjuntos de los terremotos del 3 y 18 de junio) y de 1941 muestran los daños producidos en Colima por terremotos:

1932. "Es muy posible que alrededor del 50% de las construcciones quedaran prácticamente inhabitables" (Cumming, 1933). Singh *et al.* (1985) han estimado la intensidad de los terremotos de 1932 como VIII para evento del 3 de junio y IX para el 18 de junio.

1941. De 8,000 casas de la ciudad de Colima unas 3 mil (38%) fueron demolidas (El Universal, 1941) y 900 (11%) (Silva, 1978) o 2,000 (25%) (El Universal, 1941) se derrumbaron. El Universal (1941) publicó la intensidad VIII para el evento de 1941.

Como podemos ver, después de los terremotos de 1932 hubo alrededor de 50% de daños mayores y totales; después del terremoto de 1941 hubo 38% de daños mayores y 11% (o 25%) de daños totales. Las estimaciones de daños de los eventos de 1932 y 1941 son comparables con nuestro pronóstico para la subzona I, donde la ciudad estuvo ubicada por esos años. Se puede ver que los daños y estimaciones de intensidad de los eventos de 1932 y 1941 están en buena coincidencia con el pronóstico de efectos de un terremoto que provocara una intensidad VIII en la subzona I (9% daños totales y 49% daños mayores).

De acuerdo con la buena coincidencia de nuestro pronóstico para la subzona I con las observaciones de los efectos de los terremotos de 1932 y 1941, podemos esperar que nuestro pronóstico para las zonas más modernas (II y III) sea también adecuado. Por eso, se puede predecir que las intensidades hasta VII no van a producir daños peligrosos para las casas modernas en la ciudad de Colima. El terremoto que induce una intensidad VIII va a ser dañino, pero no se puede esperar un gran número de víctimas en estas subzonas. Al mismo tiempo, las casas ubicadas en subzona I son peligrosas para la vida de sus habitantes. Es necesario plantear la reconstrucción de casas en la zona antigua de la ciudad de Colima.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los Ingenieros J. C. Tejeda Jácome, H. Saucedo Acosta, A. Sandoval Salas, F. Brizuela Gudiño y F. Pérez Ramírez, los Arquitectos F. Olmedo Buenrostro y J. Mendoza Jiménez, el M. en C. G. Cerrato Oseguera, por su participación en el trabajo de grupo de expertos. Los comentarios de J.G. Acosta Chang y Dr. M. Rodríguez fueron muy importantes para mejorar el manuscrito. Este trabajo fue patrocinado por el CONACyT a través del proyecto regional SIMORELOS 97-030-4004.

REFERENCIAS

- ATM 13, Applied Technology Council, 1985. Earthquake Damage Evaluation Data for California. Federal Emergency Management Agency, Redwood City, California.
- Caicedo, C., Yépez, Canas, J.A. y Barbat, A.H., 1996. Vulnerabilidad sísmica de edificios en entornos urbanos para estudios de riesgo. En: F.Vidal, M. Espinar y J.A. Esquivel (editores) Homenaje en Honor al Profesor Fernando de Miguel Martínez, Universidad de Granada. pp. 97-117.
- Cumming, J.L., 1933. Los terremotos de junio de 1932 en los estados de Colima y Jalisco. Revista Mensual de la Universidad de México, mayo-junio, tomo VI, No 31 432, 68-104.
- El Universal, 1941. Año 25, tomo XCVIII, No. 9,424-9,427. 17-20 de abril. México, D.F.
- García Acosta, V. y Suárez Reynoso, G., 1996. Los Sismos en la Historia de México. Ediciones Científicas Universitarias. México. 718 p.
- Pacheco, J.F. and Sykes, L.R., 1992. Seismic moment catalog of large shallow earthquakes, 1900 to 1989, Bull. Seismol. Soc. Amer., 82, 1306-1349.
- Silva, C.M., 1978. Colima Víctima del Terremoto del 15 de abril de 1941. Club del Libro Colimense, Colima.
- Singh, S.K., Ponce, L. and Nishenko, P.S., 1985. The great Jalisco, Mexico, earthquakes of 1932: Subduction of the Rivera Plate, Bull. Seismol. Soc. Amer., 75, 1301-1313.
- Soares López, J. y Acosta Chang, J., 1998. Microzonación sísmica de la ciudad de Ensenada, B.C. GEOS, 18, 265.
- Whitman, R.V., 1988. Earthquake loss estimation methodology. In: A. Vogel and K. Brandes (Editores) Earthquake Prognostics, F. Vieweg & Sohn, Wiesbaden, pp. 259-278.
- Zobin, V.M. and Ventura-Ramirez, J.F., 1998. The macroseismic field generated by the Mw 8.0 Jalisco, Mexico, earthquake of 9 October 1995, Bull. Seism. Soc. Am., 88, 703-711.