
EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICIOS HISTÓRICOS EN EL ESTADO DE COLIMA POR MÉTODOS EMPÍRICOS

Adolfo Preciado¹, Juan Carlos Araiza² y Agustín Orduña³

RESUMEN

Este artículo presenta el análisis y comparativa de diferentes metodologías cualitativas para evaluar la vulnerabilidad sísmica de edificios históricos en el Estado de Colima. La vulnerabilidad es evaluada por metodologías empíricas, incluyendo el método de categorización o caracterización (*MCC*) y el método de inspección y puntaje (*MIP*), para obtener indicadores de daño esperado que permitan la prevención de desastres. Los resultados de la evaluación de quince edificios históricos usando ambas metodologías, son comparados con el índice de vulnerabilidad real de cada edificio mostrado tras el sismo de 2003 M7.6.

ABSTRACT

This paper presents the analysis and comparative of different qualitative methodologies to assess the seismic vulnerability of historical buildings in the State of Colima. The vulnerability is assessed by empirical methodologies, including the vulnerability class method (*VCM*) and the vulnerability index method (*VIM*), to obtain indicators of expected damage that allow the disaster prevention. Results from the assessment using both methodologies of fifteen historical buildings, are compared with the real vulnerability index of every building showed after the 2003 M7.6 earthquake.

INTRODUCCIÓN

La mayoría de los edificios históricos localizados en el Estado de Colima, en México, son iglesias, principalmente construidas (o reconstruidas) en el siglo XIX. Tienen la misma tipología colonial, con variaciones en tamaño y sofisticación arquitectónica (ver figura 1). La sociedad local y las autoridades gubernamentales tienen gran interés en preservar este patrimonio cultural con sus características originales, debido a la importancia histórica y arquitectónica que estos edificios representan.

En el contexto de la sismología nacional, el Estado de Colima se distingue por su importante exposición, se le considera uno de los estados bajo mayor amenaza sísmica. Las construcciones históricas pertenecen al grupo más vulnerables ante los sismos, como quedó demostrado por el gran daño sufrido por este tipo de estructuras durante el sismo de Colima ocurrido el 21 de enero de 2003 (magnitud 7.6). El gobierno tuvo que invertir en costosos trabajos de restauración y reconstrucción, generando una restitución en la capacidad estructural de los edificios, y en algunos casos un incremento en la resistencia. Sin embargo, el factor de seguridad de cada edificio histórico, reparado o no tras el sismo de 2003, y el posible escenario de daño como consecuencia de un sismo de mayor magnitud es completamente desconocido. Debido a estas circunstancias, es necesario ejecutar estudios de riesgo sísmico en el Estado de Colima, y evaluar la vulnerabilidad sísmica de los edificios históricos. El objetivo final de estos estudios es el de obtener indicadores de daño esperado que permitan a las autoridades respectivas tomar medidas orientadas a la prevención de desastres.

-
- 1 Alumno, Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Civil, Carretera Colima-Coquimatlán km. 8.5, C.P. 28400, Coquimatlán, Colima, México. Teléfono: (312)3161167; preciadoqa@yahoo.es
 - 2 Profesor, Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Civil, Carretera Colima-Coquimatlán km. 8.5, C.P. 28400, Coquimatlán, Colima, México. Teléfono: (312)3161167; araiza@ucol.com
 - 3 Profesor, Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Civil, Carretera Colima-Coquimatlán km. 8.5, C.P. 28400, Coquimatlán, Colima, México. Teléfono: (312)3161167; aord@ucol.com

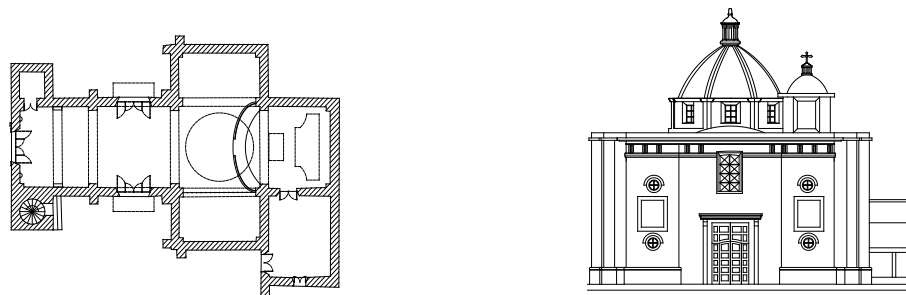


Figura 1 Planta arquitectónica y fachada típica de las iglesias de Colima

METODOLOGÍA

Con el objetivo de identificar potenciales colapsos, la vulnerabilidad sísmica de quince edificios históricos es evaluada de forma cualitativa por métodos empíricos. La base de estos métodos es la experiencia adquirida sobre el comportamiento sísmico de diferentes tipologías de edificios, y la caracterización de deficiencias estructurales potenciales. Los métodos empíricos incluyen el *MCC* y el *MIP*.

La clasificación de estructuras empleada en el *MCC*, es la Escala Macrosísmica Europea (*EMS*) propuesta por Grünthal (1998). La tabla 1 presenta un resumen de la *EMS*, tomando en cuenta solamente mampostería no reforzada. Esta metodología es considerada una técnica eficiente para evaluar la vulnerabilidad sísmica de una forma rápida y satisfactoria. La *EMS* clasifica las diferentes tipologías estructurales en seis clases de vulnerabilidad (A, B, C, D, E y F) en función de los materiales de construcción usados en el edificio (mampostería, concreto, acero y madera) y el nivel de diseño sísmico, donde A es muy vulnerable y F es menos vulnerable. Las primeras tres clases A, B y C, representan las tipologías estructurales más vulnerables (desempeño sísmico pobre), como lo son muros de mampostería de adobe, tierra compactada, bajareque, mampostería sin confinar de piedra, ladrillo de barro, y marcos de concreto reforzado construidos sin diseño sísmico. Las clase D y E representan las tipologías estructurales con vulnerabilidad media (estructuras con diseño sísmico), dentro de esta clasificación están las estructuras bien construidas de madera, acero y concreto reforzado, mampostería confinada y reforzada. Finalmente la clase F representa las estructuras con vulnerabilidad baja (estructuras con un buen diseño sísmico).

Tabla 1 Clasificación de los tipos de estructuras según su clase de vulnerabilidad (Grünthal, 1998)

Material	Tipo de estructura resistente a carga	Subtipos	Clase de vulnerabilidad					
			A	B	C	D	E	F
Mampostería	Muros de mampostería de piedra natural	Muros de escombros y mortero de lodo	X					
		Muros de piedra con mortero de cemento o cal			X			
		Muros de lodo	X					
	Muros de tierra (lodo, adobe, y tierra compactada)	Muros de lodo con elementos horizontales de madera (bajareque)		X				
		Muros de adobe	X					
		Muros de tierra compactada	X					
	Muros de mampostería de ladrillo	Muros de ladrillo sin confinar con mortero de lodo, cemento o cal		X				
		Muros de ladrillo sin confinar con mortero de lodo, cemento o cal (incluye postes verticales y horizontales de madera)		X				
		Muros de ladrillo sin confinar con mortero de lodo, cemento o cal (con losas de piso o techo de concreto reforzado)			X			

El MIP empleado en este trabajo se basa en lo propuesto por Benedetti y Petrini (1984) y GNDT (1990), para edificios de mampostería no reforzada. Este método permite identificar y caracterizar las deficiencias estructurales potenciales de un edificio, atribuyendo valores numéricos (puntos) a cada componente significativa, y determinar, finalmente, un índice de vulnerabilidad. Este método es ampliamente usado en Italia durante los últimos años, y es actualizado constantemente como resultado de la continua experimentación, resultando en una extensa base de datos sobre daño y vulnerabilidad sísmica. Los parámetros mostrados en la tabla 2, fueron compilados en una encuesta para aplicarse durante las investigaciones en campo. Basada en experiencias pasadas, la encuesta sufre modificaciones constantemente con el paso del tiempo. Un ejemplo de esto, es la encuesta desarrollada por Aguiar et al. (1994) para obtener el índice de vulnerabilidad de edificios de mampostería en España, la cual a su vez ha sido modificada para poder emplearla en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de los edificios históricos en el Estado de Colima. Esta encuesta modificada, considera aspectos fundamentales como la inminente peligrosidad sísmica del estado, el tipo de suelo y principalmente para evaluar estructuras antiguas.

Las modificaciones fueron propuestas con la finalidad de evaluar edificios de mampostería antigua bajo condiciones particulares. Estas modificaciones consisten concretamente en las siguientes: Parámetro 3: correspondiente a resistencia convencional, para este parámetro se emplea lo desarrollado en el trabajo de Astroza et al. (1993), distinguiéndose por su simplicidad de evaluación. Parámetro 4: posición del edificio y cimentación, en el cual los tipos de suelo son ajustados de acuerdo con las normas en México para suelos tipo I, II y III. Parámetro 7: configuración en elevación, la relación existente entre la altura total (H) y la altura de la torre campanario (T), se modifica por los siguientes parámetros (Siendo A) menos vulnerable y D) más vulnerable) para asignar el índice de vulnerabilidad:

A) $T/H \leq 0.2$ B) $0.2 < T/H \leq 0.3$ C) $0.3 < T/H \leq 0.5$ D) $T/H > 0.5$

Parámetro 9: tipo de cubierta, se incluye la posibilidad de que el edificio contenga el sistema de cubierta característico de los edificios históricos, como lo son bóvedas, cúpulas, etc.

Tabla 2 Escala numérica del índice de vulnerabilidad I_v para edificios de mampostería no reforzada (Benedetti y Petrini, 1984)

i	Parámetro	$K_i A$	$K_i B$	$K_i C$	$K_i D$	W_i
1	Organización del sistema resistente	0	5	20	45	1
2	Calidad del sistema resistente	0	5	25	45	0.25
3	Resistencia convencional	0	5	25	45	1.5
4	Posición del edificio y cimentación	0	5	25	45	0.75
5	Diafragmas horizontales	0	5	15	45	1
6	Configuración en planta	0	5	25	45	0.5
7	Configuración en elevación	0	5	25	45	1
8	Separación máxima entre muros	0	5	25	45	0.25
9	Tipo de cubierta	0	15	25	45	1
10	Elementos no estructurales	0	0	25	45	0.25
11	Estado de conservación	0	5	25	45	1

El empleo de la tabla 2 es simple, ya que a cada parámetro se le atribuye durante las investigaciones de campo una de las cuatro clases A, B, C y D (A: menos vulnerable, D: más vulnerable). A cada una de estas clases, le corresponde un valor numérico K_i que varía entre 0 y 45. Cada parámetro es afectado por un coeficiente de peso W_i que varía entre 0.25 y 1.5. Este coeficiente refleja la importancia de cada uno de los parámetros dentro del sistema resistente del edificio según la opinión de expertos. A continuación el índice de vulnerabilidad sísmico (I_v), se puede evaluar con la ecuación 1.

$$I_v = \sum_{i=1}^{11} K_i \cdot W_i \quad (1)$$

El índice de vulnerabilidad que se obtiene con la ecuación 1, define una escala continua de valores desde 0 hasta 382.5, que es el valor máximo posible. Este se divide por 3.825 para obtener un valor de índice de vulnerabilidad normalizado en un intervalo de $0 < I_v < 100$.

Para interpretar mejor los resultados, los intervalos para asignar la clase de vulnerabilidad a los edificios pueden apreciarse en la tabla 3.

Tabla 3 Intervalos para asignar la clase de vulnerabilidad

Intervalo	Vulnerabilidad
$I_v < 15 \%$	Baja
$15 \% \leq I_v < 35 \%$	Media
$I_v \geq 35 \%$	Alta

RESULTADOS

La vulnerabilidad sísmica es evaluada empleando métodos empíricos en quince edificios históricos localizados en el Estado de Colima, usando dos diferentes aproximaciones, el *MCC* y *MIP*.

Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de los edificios usando el *MCC*

La aplicación del *MCC* consiste en una inspección detallada de cada uno de los quince edificios históricos, en el orden de obtener la clase de vulnerabilidad relacionada con la tipología estructural de acuerdo con la tabla 1. Esta evaluación se desarrolla basándose en los materiales de construcción por los que está conformado el sistema resistente vertical (muros) del edificio, asignando una de las seis clases de vulnerabilidad A, B, C, D, E o F, donde A es muy vulnerable y F es menos vulnerable. Es muy importante mencionar que la evaluación se realiza tomando en cuenta información adicional como lo es materiales de construcción, análisis histórico, descripción estructural e intervenciones previas. La tabla 4 ilustra los resultados de la clase de vulnerabilidad obtenidos para los quince edificios históricos, considerando que las clases A y B pertenecen a vulnerabilidad alta, C y D a vulnerabilidad media, E y F a vulnerabilidad baja. Los resultados muestran que trece edificios pertenecen a la clase de vulnerabilidad media y los dos restantes a la clase de vulnerabilidad alta.

Tabla 4 Clase de vulnerabilidad sísmica para cada edificio

Nombre del edificio	Clase de Vulnerabilidad
Ruinas del Exconvento de San Francisco de Almoloyan	C (Media)
Iglesia de Nuestra Señora de la Asunción	B (Alta)
Museo Regional de Historia de Colima	C (Media)
Iglesia de San Felipe de Jesús	C (Media)
Iglesia de Nuestra Señora de la Merced	C (Media)
Catedral Basílica Menor de Guadalupe	C (Media)
Iglesia de San Pedro Apóstol	C (Media)
Iglesia de San Miguel del Espíritu Santo	C (Media)
Iglesia de Sagrado Corazón de Jesús (Colima)	C (Media)
Capilla de Virgen del Refugio	C (Media)
Casa Cural de San Jerónimo de los Santos Ángeles	A (Alta)
Iglesia de Sagrado Corazón de Jesús (Chiapa)	C (Media)
Iglesia de San José	D (Media)
Iglesia de San Francisco de Asís	C (Media)
Iglesia de Nuestra Señora de la Salud	D (Media)

Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de los edificios usando el *MIP*

El procedimiento para aplicar el *MIP* consiste en inspeccionar cuidadosamente cada uno de los quince edificios, en el orden de identificar y caracterizar las deficiencias estructurales potenciales correspondientes a los once parámetros mostrados en la tabla 2, asignando a cada parámetro una de las cuatro clases A, B, C, o D (A: menos vulnerable, D: más vulnerable), atribuyendo valores numéricos (puntos) a cada componente significativa, para determinar con la ecuación 1, el índice de vulnerabilidad (I_v), y finalmente, usando la tabla 3 para asignar una clase de vulnerabilidad (alta, media, o baja) de acuerdo con los intervalos.

Cuatro de los once parámetros no pueden ser evaluados directamente durante las inspecciones en campo, estos parámetros corresponden a la resistencia convencional, configuración en planta, configuración en elevación y separación máxima entre muros. Para evaluarlos es necesario usar herramientas computacionales para simplificar el trabajo como AutoCAD, para obtener dimensiones del edificio, elevaciones, áreas de cubiertas y elementos estructurales verticales localizados en las direcciones X y Y, separación entre muros, etc.

De igual forma que en la evaluación empleando el *MCC*, es necesario tomar en cuenta información adicional de cada edificio como lo es información gráfica, materiales empleados en su construcción, análisis histórico, descripción estructural, intervenciones anteriores y el estado de conservación actual. La tabla 5 muestra los resultados del índice de vulnerabilidad (I_v) obtenidos para los quince edificios históricos.

Tabla 5 Índice de vulnerabilidad sísmica para cada edificio

Nombre del edificio	I_v	$I_v \%$	Vulnerabilidad
Ruinas del Exconvento de San Francisco de Almoloyan	227.5	59.48	ALTA
Iglesia de Nuestra Señora de la Asunción	158.75	41.50	ALTA
Museo Regional de Historia de Colima	86.25	22.55	MEDIA
Iglesia de San Felipe de Jesús	170.00	44.44	ALTA
Iglesia de Nuestra Señora de la Merced	175.00	45.75	ALTA
Catedral Basílica Menor de Guadalupe	186.25	48.69	ALTA
Iglesia de San Pedro Apóstol	192.50	50.33	ALTA
Iglesia de San Miguel del Espíritu Santo	203.75	53.27	ALTA
Iglesia de Sagrado Corazón de Jesús (Colima)	146.25	38.24	ALTA
Capilla de Virgen del Refugio	166.25	43.46	ALTA
Casa Cural de San Jerónimo de los Santos Ángeles	158.75	41.50	ALTA
Iglesia de Sagrado Corazón de Jesús (Chiapa)	168.75	44.12	ALTA
Iglesia de San José	207.5	54.25	ALTA
Iglesia de San Francisco de Asís	175.00	45.75	ALTA
Iglesia de Nuestra Señora de la Salud	170.00	44.44	ALTA

Los resultados ilustrados en la tabla 5 son diferentes que los obtenidos con la primera aproximación, catorce edificios de los quince evaluados obtienen un índice de vulnerabilidad alta, mientras que el edificio restante obtiene un índice de vulnerabilidad media. Casi la totalidad de los edificios históricos evaluados resulta con vulnerabilidad alta, esto se debe principalmente a que los edificios antiguos presentan un pobre desempeño sísmico, ya que fueron construidos de forma empírica y para resistir únicamente fuerzas gravitacionales, dejando pasar por alto las fuerzas laterales producidas por sismo y viento. Es necesario destacar que 6 de los 11 parámetros evaluados del sistema resistente del edificio, son los de mayor coeficiente de peso (W_i) en la puntuación. Estos parámetros son la organización del sistema resistente, resistencia convencional, diafragmas horizontales, configuración en elevación, tipo de cubierta y estado de conservación (ver tabla 2). Mostrando los edificios históricos ser muy vulnerables en tres de los parámetros que se mencionan a continuación:

Organización del sistema resistente la estructuración no cumple con las características necesarias para resistir la acción de los sismos de manera satisfactoria, ya que fueron construidos sin considerar este tipo de acciones. Además, los muros ortogonales presentan una conexión deficiente y no cuentan con vigas de amarre capaces de transmitir las cargas satisfactoriamente.

Diafragmas horizontales los edificios no cuentan con este tipo de elementos estructurales en cubierta, capaces de distribuir las fuerzas laterales y gravitacionales hacia los elementos verticales. Es más común encontrar sistemas de cubierta abovedada y cúpulas.

Configuración en elevación son evidentes las irregularidades en elevación que presentan este tipo de edificios, debido a la presencia de torres campanario y cubiertas de tipo bóveda y cúpula. Las torres campanario de gran altura, respecto a la parte restante del edificio, hacen que sean elementos muy vulnerables ante la acción de un sismo.

Al evaluar estos parámetros en cada edificio histórico, la mayoría de los casos se asigna la clase de vulnerabilidad más alta (clase D), y por consiguiente un valor numérico K_i muy elevado. Influyendo esto de forma importante en que el edificio sea calificado con vulnerabilidad alta.

Adicionalmente, el índice de vulnerabilidad real de cada edificio presentado tras el sismo de 2003 M7.6, se muestra en la tabla 6. Este índice se basa principalmente en la información específica de cada edificio y la clasificación de daño observado en edificios de mampostería de la EMS.

Tabla 6 Clasificación de daño observado para cada edificio tras el sismo de 2003 de acuerdo con la EMS

Nombre del edificio	Daño EMS	Vulnerabilidad
Ruinas del Exconvento de San Francisco de Almoloyan	Grado 3	ALTA
Iglesia de Nuestra Señora de la Asunción	Grado 3	ALTA
Museo Regional de Historia de Colima	Grado 2	MEDIA
Iglesia de San Felipe de Jesús	Grado 2	MEDIA
Iglesia de Nuestra Señora de la Merced	Grado 2	MEDIA
Catedral Basílica Menor de Guadalupe	Grado 3	ALTA
Iglesia de San Pedro Apóstol	Grado 4	ALTA
Iglesia de San Miguel del Espíritu Santo	Grado 3	ALTA
Iglesia de Sagrado Corazón de Jesús (Colima)	Grado 4	ALTA
Capilla de Virgen del Refugio	Grado 2	MEDIA
Casa Cural de San Jerónimo de los Santos Ángeles	Grado 3	ALTA
Iglesia de Sagrado Corazón de Jesús (Chiapa)	Grado 3	ALTA
Iglesia de San José	Grado 3	ALTA
Iglesia de San Francisco de Asís	Grado 3	ALTA
Iglesia de Nuestra Señora de la Salud	Grado 2	MEDIA

La clasificación de daño observado de la EMS esta integrada por 5 categorías. Grado 1: sin daño o daño leve (sin daño estructural, daño no estructural leve); Grado 2: daño moderado (daño estructural leve, daño no estructural moderado); Grado 3: daño substancial a severo (daño estructural moderado, daño no estructural moderado); Grado 4: daño muy severo (daño estructural severo, daño no estructural muy severo); Grado 5: destrucción total (daño estructural muy severo).

Tabla 7 Intervalos para asignar la clase de vulnerabilidad

Clasificación de daño EMS	Vulnerabilidad
Grado 1	Baja

Grado 2	Media
Grado 3, 4 y 5	Alta

Para una mejor interpretación y comparación de los resultados mostrados en la tabla 6, los grados 1, 2, 3, 4 y 5, fueron clasificados dentro de tres intervalos (ver tabla 7) con la finalidad de asignar una clase de vulnerabilidad.

CONCLUSIONES

La vulnerabilidad sísmica de quince edificios históricos es evaluada bajo dos diferentes aproximaciones empíricas: Método de categorización o caracterización (*MCC*) y el método de inspección y puntaje (*MIP*). Es importante mencionar que el índice de vulnerabilidad real de cada edificio se obtiene de los daños observados tras el sismo de Colima presentado el 21 de enero de 2003 M7.6, de acuerdo con la clasificación de daño en edificios de mampostería de la *EMS* (ver tabla 6). Los resultados obtenidos por ambas metodologías empíricas son analizados y comparados con el índice de vulnerabilidad real de cada edificio. Se puede concluir que el *MIP* es el método que permite obtener resultados más acertados. Los catorce edificios con vulnerabilidad alta identificados por medio del *MIP*, son los edificios que resultaron seriamente dañados tras el sismo de 2003. El *MCC* mostró resultados muy pobres y los autores consideran esta metodología no confiable. Sin embargo, el *MIP* permite al usuario desarrollar una evaluación preliminar de la vulnerabilidad sísmica de forma rápida y satisfactoria. En una siguiente etapa de esta investigación, los edificios que obtuvieron un índice de vulnerabilidad alta, serán evaluados nuevamente usando metodologías cuantitativas como la combinación de métodos analíticos (teóricos) con experimentales, en el orden de comparar diferentes tipos de métodos y obtener con esto resultados más confiables en el análisis de la vulnerabilidad sísmica.

REFERENCIAS

- Aguiar R., Barbat A., Caicedo C., y Canas J. (1994), **“Vulnerabilidad sísmica de edificios”**, Monografías de Ingeniería Sísmica, CIMNE, Barcelona, España.
- Astroza M., Moroni M. O., y Küpfer M. (1993), **“Calificación Sísmica de Edificios de Albañilería de Ladrillos, Confinada con Elementos de Hormigón Armado”**, 26 Jornada Sudamericana de Ingeniería Estructural, Uruguay, Vol. 1: pp. 327-338.
- Benedetti D., y Petrini V. (1984), **“Vulnerabilidad sísmica de edificios de mampostería: Propuesta de una metodología de evaluación”**, La industria de la construcción, Roma, Italia.
- GNDT (1990), **“Riesgo sísmico de edificios públicos”**, Consejo Nacional de Investigación, Grupo Nacional para la Defensa de Terremotos, Aspectos metodológicos, Italia.
- Grünthal G. (1998), **“Escala Macrosísmica Europea (EMS)”**, Consejo Europeo, Notas del Centro Europeo de Geodinámica y Sismología.

