
CAPÍTULO III

Método del Índice de Vulnerabilidad

3 VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICIOS

3.1 Introducción

En la actualidad el porcentaje de edificios construidos con materiales frágiles o poco dúctiles como es la mampostería, sigue siendo superior a los de hormigón armado y acero, acentuándose este porcentaje en los países en vías de desarrollo. Estos edificios en muchos casos se encuentran expuestos a un riesgo sísmico potencial real, es decir, la ocurrencia de un terremoto provocaría inevitablemente daños en una menor o mayor medida, dependiendo de la calidad estructural de los mismos. Este fenómeno no es exclusivo de las zonas con una actividad sísmica alta, en zonas de sismicidad moderada o baja, la ocurrencia de un sismo puede producir daños materiales considerables, especialmente en los edificios antiguos y en aquellos que fueron construidos sin considerar una normativa sismorresistente.

Las líneas de investigación actuales sobre riesgo sísmico se han enfocado al estudio del comportamiento sísmico de los edificios, gracias al importante desarrollo alcanzado en los métodos de análisis estructural y a las técnicas experimentales que permiten conocer las características mecánicas de los edificios construidos, además del mejoramiento de las normas de diseño sismorresistente para la construcción de nuevos edificios. Sin embargo, a pesar de estos avances siguen ocurriendo grandes catástrofes ocasionadas por los terremotos, debido al colapso de los edificios. Las razones pueden ser que los métodos de análisis o las normas sismorresistentes no han sido lo suficientemente eficaces para reducir el daño en los edificios o quizás que los programas de mitigación de riesgo sísmico no se han aplicado correctamente en el caso que existan. Probablemente esta última es la más factible, es decir, por la falta de programas de planeación, las consecuencias tanto de pérdidas humanas como de daños en los edificios han sido devastadores.

Los programas de planeación o programas de mitigación sísmica, permiten tomar las medidas adecuadas en las zonas donde se ha determinado que el riesgo sísmico es alto. Para esto se necesita que la metodología elegida para evaluar la calidad estructural ó vulnerabilidad sísmica de los edificios se adecue a los objetivos planteados en el estudio. Es decir, aplicar metodologías detalladas implicaría costos muy elevados que en muchos casos no son viables e inclusive inadecuados, si es una zona de baja peligrosidad, sin embargo, aplicar metodologías simplificadas podrían eliminar aspectos importantes para conocer el comportamiento general de un área. Por tal motivo, se eligió una metodología que no se encuentre en ninguno de los dos extremos, tratando de aprovechar las ventajas de cada uno de ellos, para realizar estudios a nivel urbano adecuados.

3.2 Métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de los edificios basados en características generales de la estructura

Una de las características más importantes de los estudios de Riesgo Sísmico a nivel urbano es que la metodología que se utiliza en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de los edificios tienen que ser de alguna manera simplificada, para que se pueda aplicar a grandes áreas o a un gran conjunto de estructuras. Evidentemente cualquier metodología se puede aplicar pero con su correspondiente incremento en los costes de aplicación, que para el caso de ciudades grandes sería completamente inadmisibles. Por esta razón se tiene que encontrar la metodología que mejor se adapte a los objetivos planteados en el estudio de Riesgo Sísmico, pero sobre todo al presupuesto con que se cuente y a la disposición de información de los elementos que se pretenden estudiar (edificios, puentes, líneas vitales, etc.). En la siguiente parte de este capítulo se hará una revisión de algunas metodologías existentes que utilizan parámetros básicos (en su mayoría subjetivos) para evaluar la vulnerabilidad sísmica o calidad estructural de los edificios. Por último se describirá con mayor detalle la metodología del índice de vulnerabilidad elegida para la realización de este trabajo (Benedetti y Petrini, 1984; Yépez, 1996)

3.2.1 Sistema de puntuación del índice de vulnerabilidad sísmica de edificios

Un ejemplo de metodología utilizada en estudios a nivel urbano, basadas en la evaluación de algunos parámetros básicos pueden ser las propuestas por Chang *et al*, (1995). Esta metodología corresponde a un sistema de puntuación que evalúa el índice de vulnerabilidad sísmica de los edificios, basada en la propuesta del ATC-21, 1988 (Rapid Visual Screening of Building for Potencial Seismic Hazards) pero agregando consideraciones para tomar en cuenta las características específicas del sitio en donde se encuentran ubicados, como son el potencial de licuefacción, el tipo de cimentación y la estabilidad de taludes. Este sistema de puntuación es adecuado desde el punto de vista costo – efectividad y sobre todo útil para estudios preliminares de evaluación de la vulnerabilidad sísmica a nivel regional, obteniéndose resultados significativos dentro de los estudios de riesgo sísmico con presupuesto limitado y con la necesidad de obtener resultados rápidos. El sistema de puntuación consta de 16 criterios o parámetros afectados por un peso dependiendo de la

importancia que tenga, estos criterios están divididos en dos grupos principales: 1) Categoría estructural y 2) Categoría del sitio/cimentación (ver Tabla 3.1).

Las categorías más importantes o con mayor peso corresponden al tipo de edificio o material utilizado en su construcción y al año o aplicación de una normativa sismorresistente. La variedad de materiales utilizados en la construcción de los edificios se agrupa en 12 tipos que son: marcos sismorresistentes de acero; marcos de acero reforzados; edificios de metal ligero; marcos de acero con muros de cortante de hormigón colado en sitio; marcos sismorresistente de hormigón; marcos de acero u hormigón con muros de mampostería no reforzada; edificios inclinados; edificios de hormigón precolados; mampostería reforzada y mampostería no reforzada.

La puntuación total máxima del índice de vulnerabilidad en este método es de 108 en donde a mayor puntuación de la estructura representa una menor vulnerabilidad sísmica, obviamente no existen estructuras con una puntuación de 108, ya que es una combinación de efectos entre las características estructurales de edificio y las características del sitio, es decir, aunque una estructura obtenga la máxima calificación en la categoría estructural, por estar en un sitio con características adversas la calificación final se reduce. Una de las principales ventajas de este tipo de puntuación es el tiempo de aplicación que le lleva a una persona con ciertos conocimientos básicos de ingeniería. En algunos trabajos de campo se ha podido calcular un tiempo de entre 20 y 40 minutos por edificio dependiendo de las condiciones del sitio/estructura y la disponibilidad de datos antes de la visita.

FACTOR ESTRUCTURAL	PESO
Tipo de edificio	20
Año de construcción/Usó de Norma	20
Irregularidad Vertical	3
Piso Suave	5
Irregularidad Torsional	3
Irregularidad en Planta	3
Columnas Cortas	5
Elevación (Sólo para Hospitales)	5
Acumulación de agua	3
Revestimiento Pesado	3
Daño Visible	5
FACTOR DE CIMENTACIÓN	PESO
Tipo de suelo	10
Potencial de Licuefacción	10
Tipo de Cimentación (Para un Potencial de Licuefacción alto o moderado)	3
Estabilidad de Taludes	10
Total	108

Tabla 3.1. Sistema de puntuación de índice de vulnerabilidad sísmica propuesta por Chang, *et al*, 1995.

3.2.2 Método para la determinación de la vulnerabilidad estructural de

Hospitales

Un ejemplo de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios algo más completo es la propuesta en el trabajo de la OEA, 1993, utilizado para el manejo de peligros naturales. En este trabajo la evaluación de la vulnerabilidad estructural utiliza la metodología propuesta por Hirosawa que esta oficialmente aceptada en Japón por el Ministerio de Construcción para la evaluación de la seguridad sísmica de edificios de hormigón armado, introduciendo algunas modificaciones para poder aplicarse a las tipologías y materiales existentes en los países latinoamericanos, especialmente en Chile, Perú, México y Ecuador.

En este método, la vulnerabilidad estructural se determina comparando la capacidad resistente, relacionada con la forma, mantenimiento y daños anteriores de la edificación, con el nivel de sollicitación demandado por los sismos que representan el peligro sísmico y las condiciones locales del sitio donde se ubica la edificación. La comparación se realiza utilizando dos índices I_s ó índice de la resistencia provista por el edificio e I_{so} o índice de resistencia demandada.

El método recomienda tres niveles de evaluación que van de simple a detallado y se basa en el análisis del comportamiento sísmico de cada piso del edificio en las direcciones principales de la planta. El método fue propuesto para utilizarlo en edificios de hormigón armado de altura media existentes o dañados, con altura de entre seis y ocho niveles estructurados con muros o pórticos. Los estudios más recientes han incluido modificaciones para poder aplicarse a edificios mixtos de hormigón armado y de mampostería.

La vulnerabilidad estructural se establece comparando los valores siguientes:

- Si $I_s \geq I_{so}$ comportamiento seguro frente a un evento sísmico
- Si $I_s < I_{so}$ comportamiento incierto frente a un evento sísmico y por lo tanto inseguro

El cálculo del índice I_s depende de tres factores que se evalúan a partir de características básicas de la estructura, mediante la ecuación siguiente:

$$I_s = E_o \cdot S_D \cdot T \quad \text{ec. 3.1}$$

Donde:

- E_o : índice sísmico básico de comportamiento estructural
- S_D : índice de configuración estructural
- T : índice de deterioro de la edificación

3.2.2.1 Cálculo del factor E_o

En el nivel preliminar de la evaluación de la vulnerabilidad estructural propuesta por Hirosawa, el factor E_o se determina a partir de un cálculo simple de la resistencia última de corte de cada piso para cada dirección de la planta, a partir de la suma de los productos del

área de la sección transversal de un muro o columna y de su resistencia de corte, reduciendo este producto por un factor (α_i) que considera la presencia de elementos que alcanzan su resistencia a un nivel de deformación menor que el resto de los elementos sismorresistentes, como por ejemplo columnas cortas o muros de mampostería, reforzadas o no, si se comparan con muros o columnas de hormigón armado. El factor E_o es proporcional al producto del coeficiente de resistencia (C) y del de ductilidad (F), ec. 3.2.

$$E_o \propto C \cdot T \quad \text{ec. 3.2}$$

Para el cálculo de E_o se considera todos los elementos o subestructura vertical que forme parte del sistema resistente, clasificándolos en los siguientes 5 grupos:

- i. Columnas cortas de hormigón armado
- ii. Columnas de hormigón armado
- iii. Muros de hormigón armado
- iv. Muros de relleno de mampostería
- v. Muros de mampostería armada o muros de mampostería confinada con elementos esbeltos de hormigón armado, pilares y jácenas.

Los muros considerados corresponden a aquellos muros que se han diseñado y construido en forma tal que puedan transmitir cargas horizontales y verticales de un nivel al nivel inferior y a la cimentación; no se consideran aquellos muros que sólo resisten las cargas provenientes de su propio peso como son: parapetos y tabiques de relleno o divisorios aislados de la estructura sismorresistente. Esta clasificación debe hacerse para determinar la resistencia y para atender la menor capacidad de deformación inelástica y capacidad de disipación de energía que presentan algunos elementos, como por ejemplo las columnas cortas y los muros de mampostería de relleno sin refuerzo, cuando el comportamiento sísmico está controlado por ellos. El factor E_o se calcula con la siguiente ecuación:

$$E_o = \frac{(n_p + 1)}{(n_p + i)} \cdot \{\alpha_1 \cdot (C_{mar} + C_{sc} + C_a + C_m) + \alpha_2 \cdot C_W + \alpha_3 \cdot C_c\} \cdot F \quad \text{ec. 3.3}$$

Donde:

- α_i : es un factor de reducción de la capacidad resistente de acuerdo con el nivel de deformación que alcanzan los elementos que controlan el comportamiento sísmico. Los valores de este factor se puede obtener de la Tabla 3.2.
- n_p : número de pisos del edificio.
- i : nivel que se evalúa
- C_{mar} : índice de resistencia proporcionada por los muros de relleno de mampostería
- C_{sc} : índice de resistencia proporcionada por las columnas cortas de hormigón armado.
- C_a : índice de resistencia proporcionada por los muros de mampostería no reforzada ó parcialmente confinada.

- C_{ma} : índice de resistencia proporcionada por los muros de mampostería confinada.
- C_W : índice de resistencia proporcionada por los muros de hormigón armado.
- C_c : índice de resistencia proporcionada por las columnas no cortas de hormigón armado.
- F : índice de ductilidad asociado a los elementos verticales. $F=1.0$, si C_{mar} , C_a y C_{sc} son iguales a cero; $F=0.8$ si C_{mar} , C_a y C_{sc} son distintas de cero.

El término $(n_p+1)/(n_p+i)$ considera la relación entre el coeficiente de corte basal y el coeficiente de corte del piso i , cuando estos esfuerzos de corte se establecen en función del peso del edificio sobre el nivel considerado. Las ecuaciones completas para el calculo de los parámetros C_{mar} , C_a , C_{sc} , C_W y C_c pueden revisarse en el anexo del trabajo de la OEA, 1993.

Tipo	$\alpha 1$	$\alpha 2$	$\alpha 3$	Modo de falla
A	1.0	0.7	0.5	Muros de relleno de mampostería o columnas cortas o muros de mampostería no reforzada y parcialmente confinada o muros de mampostería confinada controlan la falla
B	0.0	1.0	0.7	Muros de hormigón armado controlan la falla
C	0.0	0.0	1.0	Columnas de hormigón armado controlan la falla

Tabla 3.2. Valores de los coeficientes α_i .

3.2.2.2 Cálculo del factor S_D

Este factor cuantifica la influencia de las irregularidades de la configuración estructural y de la distribución de rigidez y de masa en el comportamiento sísmico de la edificación. La información para calcular S_D se obtiene principalmente de los planos estructurales y se complementa con visitas al sitio. Las características del edificio que se consideran en la determinación de este coeficiente son: regularidad de la planta, relación largo – ancho de la planta, estrangulaciones de la planta, espesor de las juntas de dilatación, dimensiones y ubicación de patios interiores, existencia de subterráneo, uniformidad de la altura de los pisos, excentricidad de rigidez en planta, irregularidades de la distribución de las masas de la rigidez de entrepiso de los pisos en altura, etc. Hirosawa, propone calcular S_D , cuando se usa el nivel preliminar de evaluación de vulnerabilidad mediante la ecuación 3.4.

$$S_D = \prod_{i=1}^8 q_i \tag{ec. 3.4}$$

Donde:

$$q_i = \{ 1.0 - (1 - G_i) \cdot R_i \} \text{ para } i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \text{ y } 8$$

$$q_i = \{ 1.2 - (1 - G_i) \cdot R_i \} \text{ para } i = 6$$

G_i y R_i se obtienen de la Tabla 3.3.

Conceptos (q_i)	G_i			R_i
	1.0	0.9	0.8	
1. Regularidad	Regular (a_1)	Regular (a_2)	Regular (a_3)	1.0
2. Relación largo – ancho	$B \leq 5$	$5 < B \leq 8$	$B > 8$	0.5
3. Contratación de planta	$0.8 \leq c$	$0.5 \leq c < 0.8$	$c < 0.5$	0.5
4. Atrio o patio interior	$R_{ap} = 0.1$	$0.1 < R_{ap} \leq 0.3$	$0.3 < R_{ap}$	0.5
5. Excentricidad de atrio o patio interior	$f_1 = 0.4$ $f_2 = 0.1$	$f_1 \leq 0.4$ $0.1 < f_2 \leq 0.3$	$0.4 < f_1$ $0.3 < f_2$	0.25
6. Subterráneo	$1.0 \leq R_{as}$	$0.5 \leq R_{as} < 1.0$	$R_{as} < 0.5$	1.0
7. Junta de dilatación	$0.01 \leq s$	$0.0005 \leq s < 0.01$	$s < 0.0005$	0.5
8. Uniformidad de altura de piso	$0.8 \leq R_h$	$0.7 \leq R_h < 0.8$	$R_h < 0.7$	0.5

Tabla 3.3. Valores propuestos por Hirosawa, para los parámetros G_i y R_i , la descripción de cada concepto (q_i) puede verse en el trabajo de la OEA, 1993.

3.2.2.3 Cálculo del factor T

El factor T , cuantifica los efectos que produce el deterioro de la estructura debido al paso del tiempo o bien a la acción de sismos pasados u otras acciones que puedan haberla afectado. El índice se calcula a partir de la información obtenida de las visitas al edificio y de la información que proporcione el propietario. El factor T se determina de la Tabla 3.4, correspondiendo al menor obtenido de los cinco conceptos.

Concepto	Característica	Valor T_i
T1. Deformación permanente	El edificio presenta inclinación debido a asentamiento diferencial	0.7
	El edificio está construido sobre relleno artificial	0.9
	El edificio ha sido reparado debido a deformaciones presentadas anteriormente	0.9
	Visible deformación de vigas o columnas	0.9
	No presenta signos de deformación	1.0
T2. Grietas en muros o columnas debido a corrosión del acero de refuerzo	Presenta filtraciones con corrosión visible de armaduras	0.8
	Grietas inclinadas visibles en columnas	0.9
	Grietas visibles en muros	0.9
	Presenta filtraciones, pero sin corrosión de armaduras	0.9
	Nada de lo anterior	1.0
T3. Incendios	Ha experimentado incendio, pero no fue reparado	0.7
	Ha experimentado incendio y fue adecuadamente reparado	0.8
	No ha experimentado incendio	1.0
T4. Uso del bloque	Almacena sustancias químicas	0.8
	No contiene sustancias químicas	1.0
T5. Tipo de daño estructural	Daño estructural grave	0.8
	Daño estructural fuerte	0.9
	Daño estructural ligero o no estructural	1.0

Tabla 3.4. Valores del factor T .

3.2.2.4 Cálculo del índice I_{so}

Finalmente el índice I_{so} se utiliza para determinar si una estructura es segura frente a

un evento sísmico, cuyo valor se obtiene de la ecuación 3.5.

$$I_{so} = E_{so} \cdot Z \cdot G \cdot U \quad \text{ec. 3.5}$$

Donde:

- E_{so} : Resistencia básica requerida.
- Z : Factor de zona sísmica; su valor depende del peligro sísmico del lugar donde se ubica el edificio ($0.5 \leq Z \leq 1$).
- G : Factor de influencia de las condiciones topográficas y geotécnicas. Se considera igual a 1.0 para condiciones topográficas sin pendiente e igual a 1.1 para zona de pendiente.
- U : Factor de importancia del edificio por su uso. Se toma igual a 1, dado que las condiciones demandadas por el uso del edificio se consideran al establecer el valor de E_{so} .

3.2.3 Nivel de vulnerabilidad potencial desarrollado por HMC, 1997

Uno de los objetivos de esta metodología es determinar o identificar qué sección de un edificio existente será susceptible a sufrir un daño ocasionado por un terremoto debido a la falla de alguno de sus componentes. Esto permitirá elaborar planes que permitan reducir el daño en los edificios minimizando el riesgo de pérdidas de vidas humanas y de alguna forma modificar los reglamentos para diseño de estructuras nuevas.

La evaluación de la vulnerabilidad de un edificio involucrará la identificación de los sistemas de marcos resistentes, sistemas de fachada y si el edificio contiene elementos vulnerables como la mampostería no reforzada, pisos blandos, formas estructurales irregulares y cualquier sistema mecánico o eléctrico, que necesite seguir funcionando una vez ocurrido el terremoto (Figura 3.1).

El riesgo de falla de un edificio se puede evaluar asignando una vulnerabilidad potencial causada por:

- 1) El incremento en los requerimiento de la carga de diseño (provocadas por un terremoto).
- 2) En nivel de la funcionalidad para el comportamiento post-terremoto.
- 3) El número de ocupantes que utilizan el edificio.

Este nivel de vulnerabilidad potencial se puede evaluar de una forma sencilla utilizando criterios de comportamiento como la viabilidad del tipo de edificio, uso, requerimientos post-terremoto y localidad. Estos criterios se determinan basándose en los factores de la Tabla 3.5, cuya suma permitirá obtener el valor de la vulnerabilidad potencial.

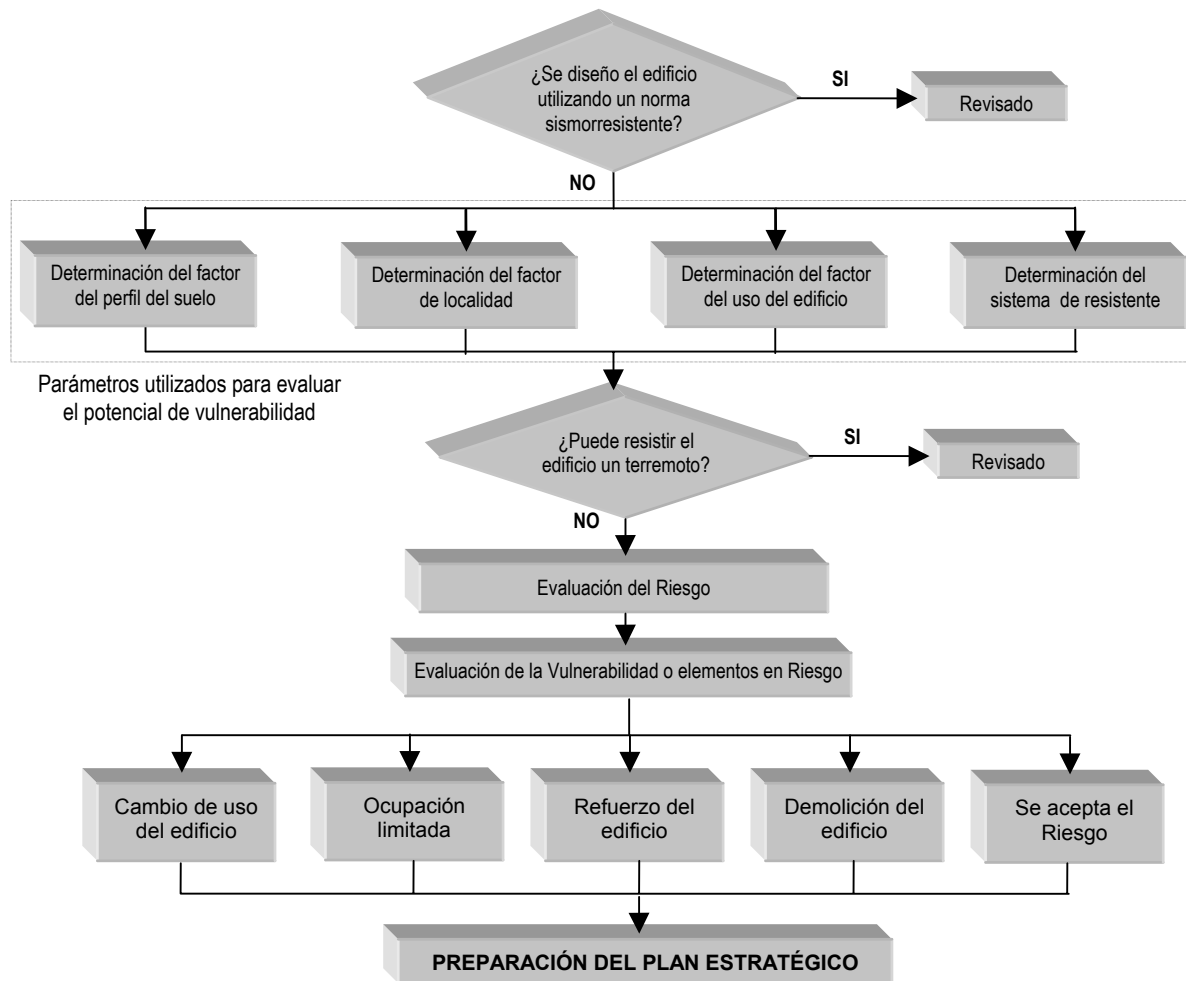


Figura 3.1. Procedimiento utilizado para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de los edificios en Queensland, Australia (HMC, 1997).

	Perfil de Suelo	Factor de Riesgo
Riesgo del perfil de suelo	Tipo A	1
	Tipo B	2
	Tipo C	3
	Tipo D	4
	Tipo E	5

	Número de habitantes	Factor de Riesgo
Riesgo de Edificio	Menos de 5	1
	5 – 10	2
	11 – 20	3
	21 – 50	4
	Más de 50	5

	Aceleración del terreno	Factor de Riesgo
Riesgo de Localidad	0.3 – 0.4	1
	0.4 – 0.6	2
	0.6 – 0.8	3
	0.8 – 1.0	4
	> 1.0	5

	Tipo de edificio	Factor de Riesgo
Función post-desastre	Esencial (Hospital)	1
	Necesario (Ayunta)	2
	No necesario (Comercios)	3
	Residencial	4

Tabla 3.5. Factores necesarios para evaluar la vulnerabilidad potencial de edificios en Queensland, Australia.

3.3 Método del índice de vulnerabilidad (Benedetti y Petrini, 1982)

Como se ha observado antes, la evaluación de la vulnerabilidad o calidad estructural de los edificios no es única y el procedimiento o parámetros utilizados para la evaluación también varían. Esto obviamente plantea un problema, ¿Cuál de las metodologías existentes para evaluar la vulnerabilidad de los edificios es la adecuada? La respuesta estará en los objetivos planteados para el estudio, las hipótesis empleadas y por supuesto de la información que necesite la metodología.

En este trabajo se decidió aplicar la *Metodología del Índice de Vulnerabilidad* propuesta por un grupo de investigadores italianos en 1982, que fue desarrollada a partir de la información de daño en edificios provocados por terremotos desde 1976. A partir de esta información se elaboró una gran base de datos con el índice de vulnerabilidad de cada edificio y el daño sufrido por terremotos de determinada intensidad.

Algunas de las razones que se tomaron en cuenta para elegir esta metodología fueron:

- a) Esta fundamentada en datos reales.
- b) Se puede aplicar en estudios a nivel urbano.
- c) Se tiene la experiencia de haberse aplicado en diferentes ciudades de Italia con buenos resultados y como consecuencia se adoptó oficialmente por un organismo gubernamental de protección civil (Gruppo Nazionale per la Difesa dei Terremoti, GNDT).
- d) Se ha aplicado en España en los sismos de Almería en 1993 y 1994 (Yépez, 1994) y Murcia en 1999 (Mena, *et al* 1999).
- e) En general se ha aplicado en diversos trabajos como los de Angeletti *et al*, 1988; Benedetti *et al*, 1988; Caicedo, 1993; Barbat *et al*, 1996; Grimaz, 1994; Yépez, 1996; Mena, 1997a; el proyecto Europeo SERGISAI, 1998; Mena *et al*, 1999, entre otros.

La metodología se desarrolló para las tipologías de mampostería no reforzada y hormigón armado, poniendo un especial interés en las primeras debido a que son las construcciones con mayor porcentaje en Italia y en general en muchas partes del mundo. De esta forma, se hará una revisión de la metodología del índice de vulnerabilidad para cada tipología haciendo hincapié en los principios utilizados para su adaptación a la ciudad de Barcelona.

3.3.1 Índice de vulnerabilidad para estructuras de mampostería no reforzada

El *método del índice de vulnerabilidad* (Benedetti y Petrini, 1984) identifica los parámetros más importantes que controlan el daño en los edificios causados por un terremoto. El método califica diversos aspectos de los edificios tratando de distinguir las diferencias existentes en un mismo tipo de construcción o tipología. Ésta es una ventaja sobre los métodos que clasifican las construcciones por tipología, material ó año de construcción como

son el ATC-13 y las escalas de intensidad EMS-98, MSK, entre otros. Esta metodología considera aspectos como la configuración en planta y elevación, el tipo de cimentación, los elementos estructurales y no estructurales, el estado de conservación, y el tipo y calidad de los materiales para evaluar los parámetros que calificados individualmente en una escala numérica (afectada por un peso W_i , que trata de enfatizar su importancia relativa en el resultado final), proporciona un valor numérico de la calidad estructural o vulnerabilidad sísmica de los edificios de hormigón.

En total son once parámetros que calificados con su valor máximo se obtiene un índice de 382.5 (el valor mínimo es 0.0). La Tabla 3.6, muestra los once parámetros considerados en la calificación de las estructuras, los valores correspondientes a los coeficientes de calificación posible K_i de acuerdo a la condición de la calidad (de A –óptimo– a D –desfavorable–) y a los factores de peso W_i asignados a cada parámetro. Los factores K_i y W_i se obtuvieron de una manera subjetiva basada en la experiencia de los investigadores y de los datos reales obtenidos en cada evento sísmico. Finalmente, el índice de vulnerabilidad global de cada edificio se evalúa utilizando la ecuación 3.6:

$$I_v = \sum_{i=1}^{11} K_i \cdot W_i \quad \text{ec. 3.6}$$

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	1.0
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	1.0
6	Configuración en planta	0	5	25	45	0.5
7	Configuración en elevación	0	5	25	45	1.0
8	Separación máxima entre muros	0	5	25	45	0.25
9	Tipo de cubierta	0	15	25	45	1.0
10	Elementos no estructurales	0	0	25	45	0.25
11	Estado de conservación	0	5	25	45	1.0

Tabla 3.6. Escala numérica del índice de vulnerabilidad I_v de los edificios de mampostería no reforzada (Benedetti and Petrini, 1984).

De los valores obtenidos en los estudios post-terremoto en Italia, con respecto al índice de vulnerabilidad y daño en los edificios se obtuvieron correlaciones para diferentes intensidades, utilizando funciones de vulnerabilidad. Dichas funciones relacionan el índice de vulnerabilidad (I_v) con un índice de daño económico global (ID) para un intensidad dada. Un ejemplo de estas funciones se puede ver en la Figura 3.2 (Angeletti *et al*, 1988), fruto de varios análisis de los levantamientos después de los terremotos en las localidades de Venzona y Barrea en Italia y expresadas matemáticamente de la siguiente manera:

$$D = 100 \cdot \left[\rho + k \cdot I_v + \frac{I_v^2}{I_v^2 + A^2} \right] \quad \text{ec. 3.7}$$

En donde los coeficientes ρ , k y A se obtienen del análisis de correlación.

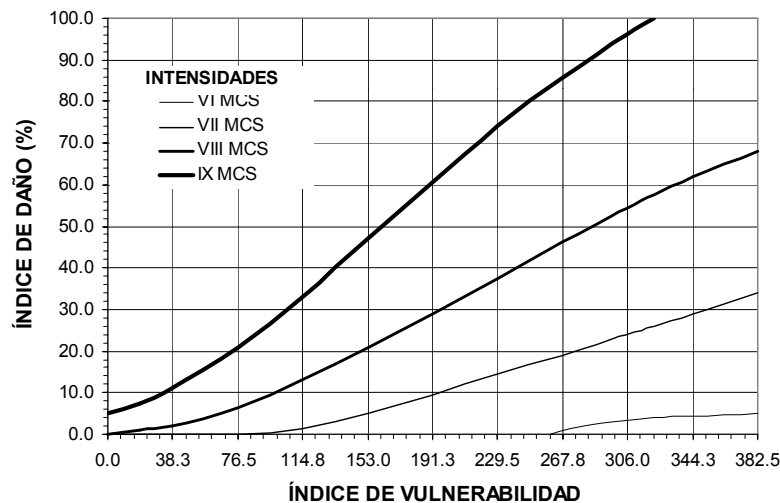


Figura 3.2. Funciones de índice de vulnerabilidad propuesta por Angeletti *et al*, 1988.

Evidentemente, estas funciones de vulnerabilidad sólo se pueden aplicar a las zonas en donde se realizó el estudio, ya que depende de factores como el tipo de material, forma constructiva, tipo de suelo y al factor subjetivo de las personas que realizan los levantamientos, entre otras razones, por lo que la aplicación directa de las funciones en algún otro sitio podría conducir a resultados erróneos e inclusive, dependiendo del objetivo del estudio peligrosos. Sin embargo, la metodología del índice de vulnerabilidad sí se puede exportar a otros sitios, en donde se requiera realizar estudios de riesgo sísmico, como ha sido el caso de España, en el que por primera vez se obtuvieron funciones de vulnerabilidad fuera de Italia utilizando dicha metodología.

El índice de vulnerabilidad se puede entender como un valor que ayuda a evaluar la falta de seguridad en los edificios ante cargas sísmicas, además forma parte de la definición de las funciones de vulnerabilidad, las cuales relacionan el índice de vulnerabilidad I_v con el índice de daño global de las estructuras. El daño observado en los edificios después de un terremoto ó la simulación por ordenador del daño estructural utilizando modelos mecánicos ó matemáticos, permiten deducir por medio de métodos probabilistas las funciones de vulnerabilidad. El índice de daño global D , caracterizado por el estado estructural de un edificio completo después de un sismo puede ser definido como la combinación ponderada de los valores describiendo el estado post-terremoto de los diferentes componentes estructurales tales como los elementos verticales y horizontales, los muros y los componentes no estructurales. El resultado final es el índice de daño en un rango de valores entre 0 y 100% (ver Figura 3.2).

3.3.2 Funciones de vulnerabilidad observada y simulada para edificios de mampostería no reforzada en España

Para obtener funciones de vulnerabilidad observadas en España, se realizó un estudio post-terremoto después de la ocurrencia de dos sismos en la región de Almería, al sudoeste de España el 23 de Diciembre de 1993 y 4 de Enero de 1994, cuya intensidad máxima estimada en el sitio fue de VII en la escala MSK, cuyo uso es muy extendido en España y los países Europeos (Yépez, 1994; Barbat *et al* 1996).

El estudio empezó con el levantamiento del daño de los edificios de mampostería no reforzada y de las estructuras de hormigón afectados por los terremotos. El tipo y la extensión del daño se analizaron y clasificaron para cada parte estructural y no estructural de los edificios y se correlacionaron con el índice de daño definido por la metodología del índice de vulnerabilidad. La calidad estructural o vulnerabilidad sísmica de los edificios se evaluó siguiendo las recomendaciones de la misma metodología.

Una vez calculado el índice de vulnerabilidad y el índice de daño para cada edificio se realizó un análisis estadístico, con el cual se obtuvo una función de vulnerabilidad para los edificios de mampostería no reforzada correspondiente a una intensidad de VII en la escala MSK. En la Figura 3.3 se muestran los datos del levantamiento realizado, así como la función obtenida a partir de una regresión polinomial de grado tres, comparándola con las funciones propuestas por Angeletti *et al*, (1988) para las intensidades VI, VII y VIII de la escala MCS (Mercalli–Cancani–Sieberg) utilizada en Italia. La comparación es posible debido a la similitud que existe entre los grados de intensidad definidos por las escalas MCS y MSK. Los resultados permitieron obtener la primera función observada de un estudio post-terremoto en España y la primera obtenida fuera de Italia utilizando el método del índice de vulnerabilidad (Yépez, 1994).

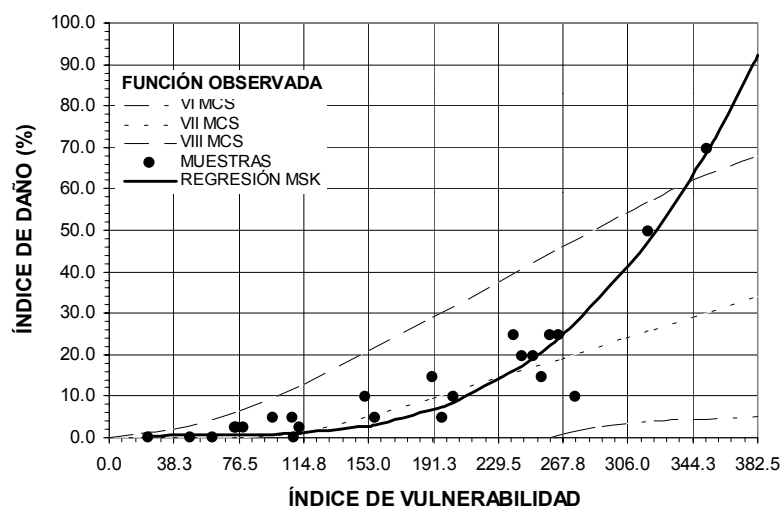


Figura 3.3. Función de vulnerabilidad observada para edificios de mampostería no reforzada en España para un nivel de intensidad de VII en la escala MSK (Yepez, 1994). Las funciones propuestas por Angeletti *et al*, 1988 se representan por líneas discontinuas.

El levantamiento de las estructuras dañadas en la región de Almería permitió obtener

sólo una función de vulnerabilidad, correspondiente a una intensidad VII en la escala MSK. Con el objeto de obtener funciones de vulnerabilidad para otros niveles de intensidad fue necesario recurrir a procesos de simulación por ordenador. El primer paso de este proceso fue simular la función de vulnerabilidad para una intensidad VII (MSK) y calibrarla con la función de vulnerabilidad observada de la Figura 3.3. Se generó de una manera aleatoria información de 60 edificios hipotéticos, respondiendo a las características reales de edificios existentes en el área de estudio. Se consideró una ley de distribución de probabilidad uniforme para los datos. Cada parámetro que requiere la metodología italiana se estimó en base a los datos generados y, de esta manera, se calculó el índice de vulnerabilidad I_v . Con los datos de los edificios se realizaron análisis estructurales con el objeto de determinar el índice de daño global para cada intensidad macrosísmica D . La relación propuesta por Chung and Shinozuka (1988) se utilizó para determinar este índice de daño global mediante una suma ponderada del índice de daño de cada piso individual normalizándolo y expresándolo como porcentaje. Con los puntos obtenidos, como se muestra en la Figura 3.4, se realizó un análisis regresional obteniendo la curva continua gruesa. Esta muestra además la función de vulnerabilidad observada.

La función ajustada a los puntos simulados en la Figura 3.4, constituye una primera iteración de un proceso para calibrar los pesos correspondientes a los 11 parámetros que intervienen en el cálculo de la vulnerabilidad de los edificios de forma que la función simulada coincida con la observada en la campaña de Almería. Después de 2 iteraciones se consiguió que la forma de las funciones observada y simulada fueran muy similares alcanzando un coeficiente de correlación del 90%. Una vez que el proceso de simulación se realizó para una intensidad VII en la escala MSK, se efectuaron varias simulaciones para intensidades VI, VIII y IX de la misma escala, utilizando los pesos W_i obtenidos en el proceso anterior. El resultado final se muestra en la Figura 3.5, en donde se muestran las cuatro curvas generadas para las intensidades consideradas anteriormente.

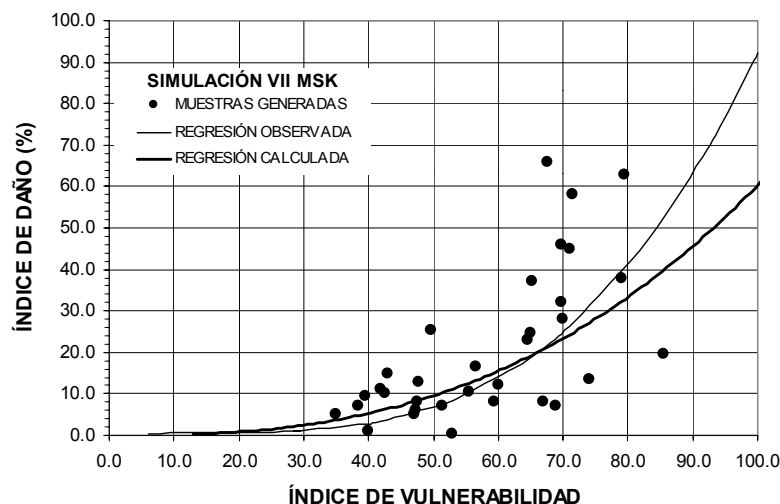


Figura 3.4. Función de vulnerabilidad simulada para intensidad VII MSK (curva gruesa) y función de vulnerabilidad observada (curva delgada). Cada punto corresponde a por lo menos un edificio generado.

Una vez que el proceso de simulación se realizó para una intensidad de VII en la

escala MSK, varias simulaciones para las intensidades de VI, VIII y IX en la escala MSK se realizaron utilizando los pesos W_i calibrados obtenidos en el proceso anterior. El resultado de las funciones simuladas para las diferentes intensidades se muestra en la Figura 3.5, en donde además se superponen con las funciones de vulnerabilidad propuestas por Angeletti *et al*, 1988, representadas por las líneas discontinuas para observar las diferencias entre ambas regiones.

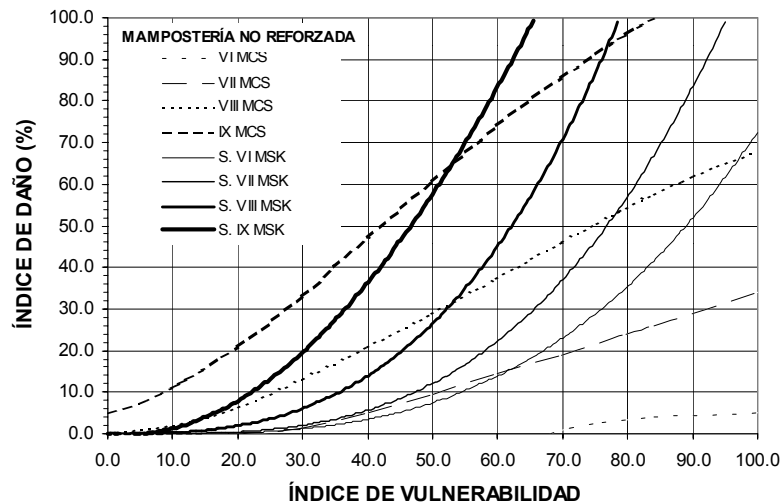


Figura 3.5. Función de vulnerabilidad para los edificios de mampostería no reforzada para diferentes niveles de intensidad en la escala MSK (Yépez, 1996). Las líneas discontinuas delgadas representan las funciones italianas propuestas por Angeletti *et al.* (1988).

Las funciones de vulnerabilidad obtenidas se representan por regresiones polinómicas (ec. 3.8), cuyo coeficientes para las diferentes intensidades se muestran en la Tabla 3.7.

$$D(\%) = a_1 \cdot I_v + a_2 \cdot I_v^2 + a_3 \cdot I_v^3 \quad \text{ec. 3.8}$$

En donde:

a_1, a_2 y a_3 son los coeficientes obtenidos en el cálculo de la regresión

Intensidad	a_1	a_2	a_3	Correlación (%)
VI	0.0048	-0.0014	0.000086	80
VII	0.0170	-0.0025	0.000140	89
VIII	-0.0047	0.0012	0.000190	88
IX	-0.1500	0.0280	-0.000039	91

Tabla 3.7. Valores de los coeficientes de las funciones de vulnerabilidad para los edificios de mampostería, obtenidos en el cálculo de las regresión polinómicas.

3.3.3 Funciones de vulnerabilidad simulada para edificios de hormigón armado en España

Para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las *estructuras de hormigón armado*, se utiliza un procedimiento similar al explicado anteriormente. Primero, se elabora una tabla similar a la propuesta para los edificios de mampostería considerando las características más importantes que influyen en el comportamiento sísmico de las estructuras, sin embargo, en este caso se asignan solamente tres calificaciones a diferencia de las cuatro propuestas para los edificios de mampostería. Estas calificaciones se muestran en la Tabla 3.8. Una vez evaluado cada parámetro se realiza una suma ponderada utilizando los factores de peso mostrados en la Tabla 3.8., para obtener el índice de vulnerabilidad final mediante la siguiente expresión:

$$I_v = 100 \cdot \frac{\left(\sum_{i=1}^{11} K_i \cdot W_i \right) + 1}{34} \quad \text{ec. 3.9}$$

Las funciones de vulnerabilidad simuladas para los edificios de hormigón armado se muestran en las Figuras 3.6 y 3.7. Estas funciones se generaron para dos tipos de estructuración: a) para edificios de hormigón armado con pórticos sismorresistentes y b) para edificios de hormigón armado con losas reticulares. La diferencia más importante es que los edificios del primer tipo de estructuración se comportan mejor ante un sismo que los segundos por tener una mejor capacidad de deformación, lo que permite una mayor liberación de energía.

<i>i</i>	Parámetro	<i>K_i A</i>	<i>K_i B</i>	<i>K_i C</i>	<i>W_i</i>
1	Organización del sistema resistente	0	1	2	4.0
2	Calidad del sistema resistente	0	1	2	1.0
3	Resistencia convencional	-1	0	1	1.0
4	Posición del edificio y cimentación	0	1	2	1.0
5	Diafragmas horizontales	0	1	2	1.0
6	Configuración en planta	0	1	2	1.0
7	Configuración en elevación	0	1	3	2.0
8	Conexión entre elementos críticos	0	1	2	1.0
9	Elementos de baja ductilidad	0	1	2	1.0
10	Elementos no estructurales	0	1	2	1.0
11	Estado de conservación	0	1	2	1.0

Tabla 3.8. Escala numérica del índice de vulnerabilidad I_v para las estructuras de hormigón armado (Benedetti y Petrini 1984).

La función de vulnerabilidad correspondiente a una intensidad de VI en la escala MSK no se representa para los edificios aporticados con vigas y columnas, debido a que los índices de daño eran menores a un 5%, por lo que pueden considerarse despreciables. Para los edificios aporticados con losas y columnas los valores para una intensidad de IX no se

incluyen ya que se ha calculado que en este caso la mayoría de los edificios colapsarían.

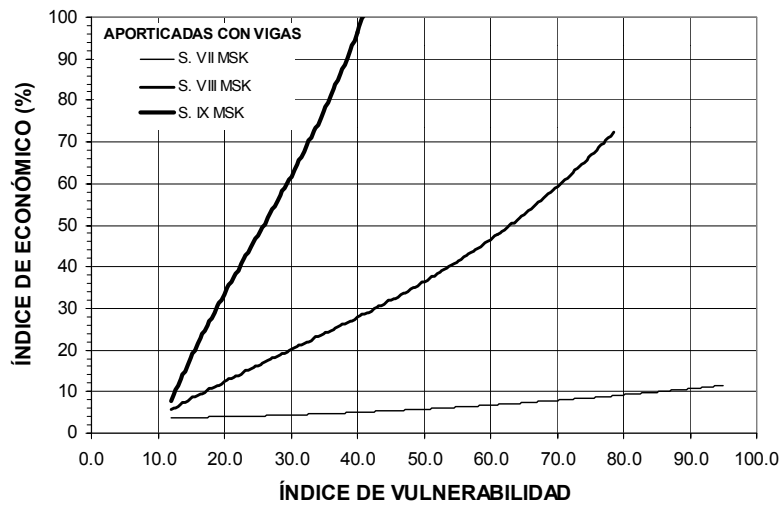


Figura 3.6. Función de vulnerabilidad para edificios de hormigón armado con pórticos sismorresistentes para las intensidades VII, VIII y IX en la escala MSK (Yépez, 1996).

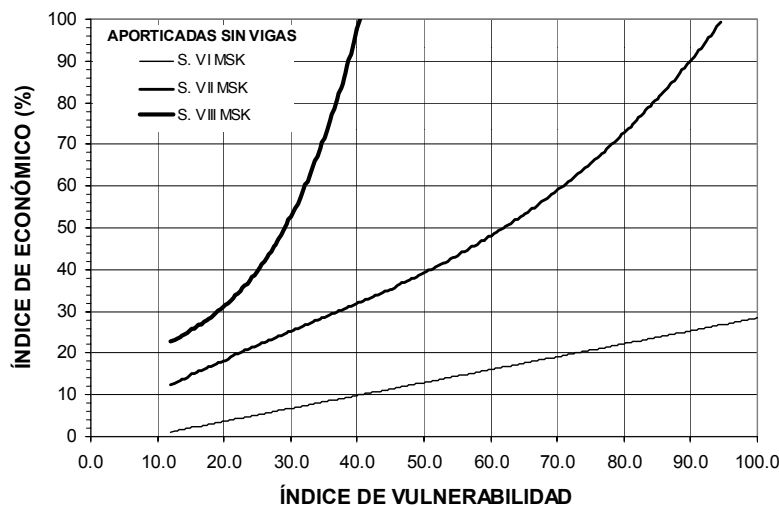


Figura 3.7. Función de vulnerabilidad para edificios de hormigón armado de losas reticulares para las intensidades VI, VII y VIII en la escala MSK (Yépez, 1996).

Finalmente, las funciones de vulnerabilidad se obtuvieron utilizando un ajuste polinomial mediante técnicas de mínimos cuadrados, cuyo resultado tienen la siguiente forma (ec. 3.10):

$$D(\%) = a + b \cdot I_v + c \cdot I_v^2 + d \cdot I_v^3 \quad \text{ec. 3.10}$$

En donde a , b , c y d corresponden a los coeficientes obtenidos en el cálculo de la regresión y cuyos resultados se muestran en las Tablas 3.9 y 3.10.

Intensidad	a	b	c	d	R (%)
VII	3.6	0.00027	0.00087	0.00	68.1
VIII	-6.1	1.1	0.0115	0.00013	96.1
IX	-49.8	6.2	-0.14	0.00191	91.5

Tabla 3.9. Valores de los coeficientes de las funciones de vulnerabilidad para los edificios de hormigón armado aporticados con vigas y columnas, obtenidos en el cálculo de las regresión polinómicas.

Intensidad	a	b	c	d	R (%)
VI	-2.9	0.31	0.0	0.0	84.1
VII	1.7	1.0	-0.11	0.00012	67.1
VII	10.3	1.5	-0.63	0.002	83.7

Tabla 3.10. Valores de los coeficientes de las funciones de vulnerabilidad para los edificios de hormigón armado aporticados con losas reticulares, obtenidos en el cálculo de las regresión polinómicas.

3.4 Segunda función de vulnerabilidad observada en España para edificios de mampostería no reforzada

Las funciones de vulnerabilidad obtenidas en Italia tienen una base fundamentada en datos reales de daño en edificios que fueron provocados por terremotos pasados y que desgraciadamente se actualizan y comprueban con datos de nuevos eventos. Esta situación no es ajena a lo que ocurre en España, porque a los datos de daño que provocaron los sismos de Almería en 1993 y 1994 (Yépez, 1994), en donde se obtuvo la primera función de vulnerabilidad con datos reales, se tiene que agregar los datos de daño en edificios provocados por el sismo de Murcia en 1999, cuya magnitud fue de 5.2 en escala Richter y epicentro con coordenadas de 38° 9' Norte y 1° 30' Oeste (Mena *et al*, 1999).

El terremoto de Murcia alcanzó una intensidad de VII en la escala MSK y afectó varias poblaciones de la comunidad de Murcia, entre las que se encontraron la pedanía de La Puebla de Mula que junto con Campos del Río y Albudeite, fueron posiblemente las poblaciones más dañadas por el terremoto; en las poblaciones de Cieza, Archena también se reportaron daños pero en menor medida. Los edificios más afectados por el terremoto fueron los de mampostería no reforzada (Figura 3.8), que en algunos casos incluso llegaron al colapso, también se reportaron daños en edificios de hormigón armado principalmente en forma de grietas en muros divisorios y caídas de parapetos, y finalmente se reportaron daños menores en algunos puentes.



Figura 3.8. Construcciones de mampostería no reforzada dañadas en la población de la Puebla de Mula debidas al terremoto del 2 de Febrero de 1999.

El levantamiento del índice de vulnerabilidad y daño en los edificios afectados por el terremoto se realizó siguiendo el procedimiento propuesto por Yépez (1996), para un total de 24 edificios de mampostería no reforzada. En la población de la Puebla de Mula (Figura 3.9), se observó que la mayoría de daños producidos por el terremoto fueron en edificios antiguos, cuyo comportamiento ante un sismo de mediana intensidad fue deficiente, ya que la ligazón entre las paredes ortogonales fue muy pobre. El material de construcción de estas edificaciones antiguas es de mampostería muy heterogénea con espesores comprendidos entre 35 y 70 cm, sin embargo, a pesar de su espesor se pudo apreciar daños considerables en los edificios.

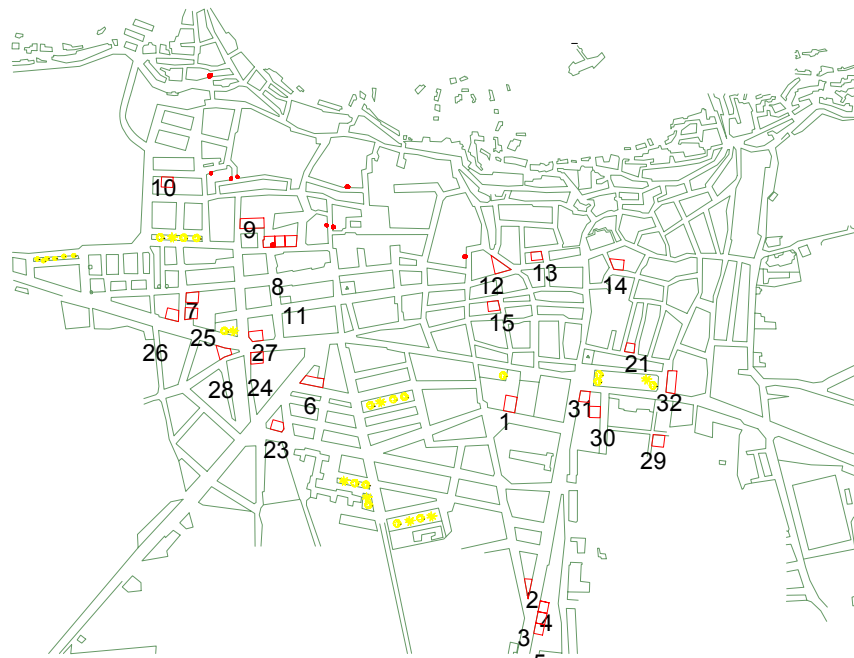


Figura 3.9. Localización de los edificios estudiados en Puebla de Mula dañados por el terremoto de Murcia.

Una vez evaluado el índice de vulnerabilidad y el daño para los edificios de mampostería se calculó la segunda función de vulnerabilidad observada en España, mediante una regresión polinomial (Figura 3.10), siguiendo el procedimiento propuesto por Yépez, 1999, para poder comparar los resultados obtenidos. Esto fue posible, gracias a que las zonas de estudio son relativamente cercanas, lo que hace que los materiales de construcción y los procesos constructivos sean muy similares.

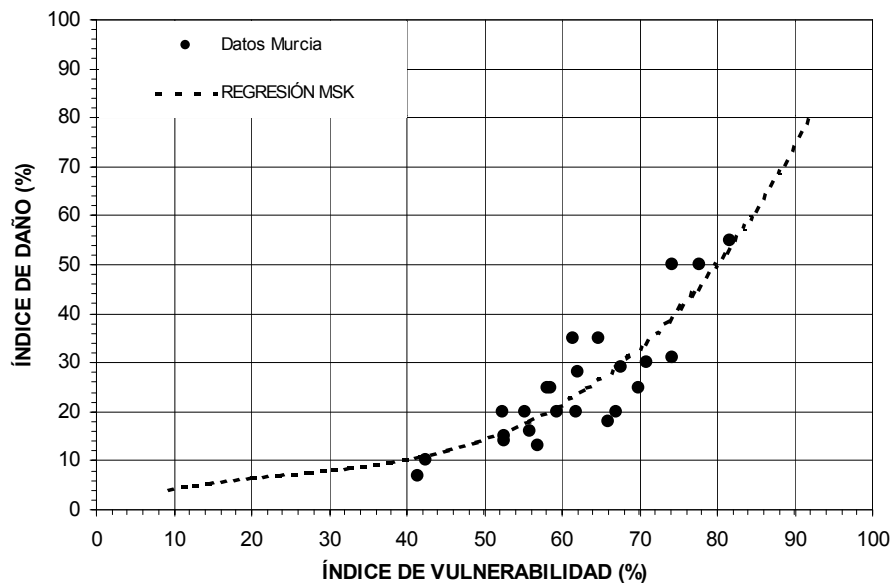


Figura 3.10. Función de vulnerabilidad observada para edificios de mampostería no reforzada para intensidad de VII en la escala MSK (Mena et al 1999).

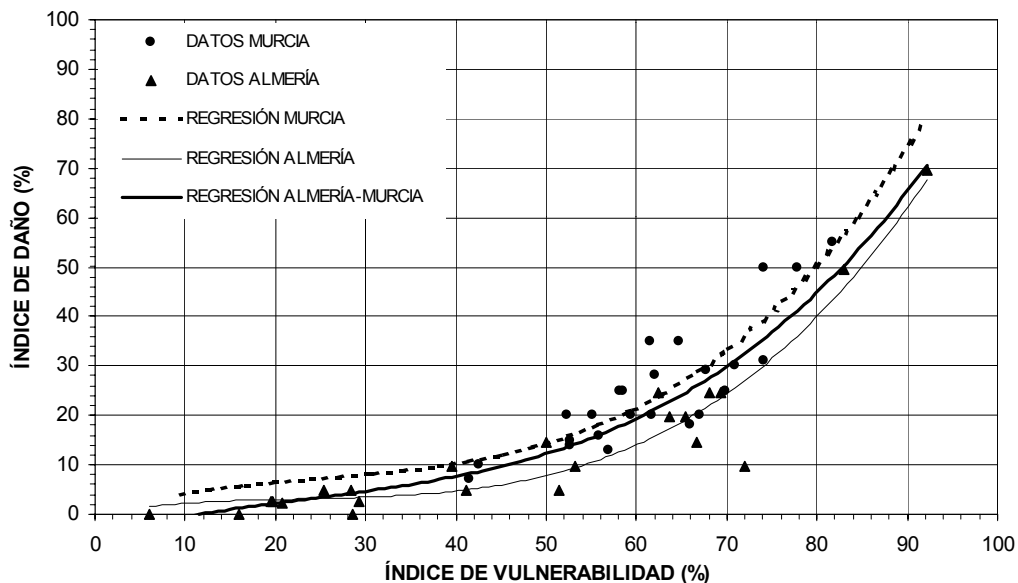


Figura 3.11. Comparación de las funciones de vulnerabilidad obtenidas a partir de los daños observados en construcciones de mampostería no reforzada como consecuencia de los terremotos de Almería y Murcia.

La similitud de las características de construcción de las dos zonas de estudio (Almería y Murcia), permitirán hacer la comparación de los datos del índice de vulnerabilidad e índice de daño de los edificios de mampostería. Esta comparación se observa en la Figura 3.11, con los datos de los levantamientos realizados y las respectivas funciones obtenidas, mostrando un comportamiento similar. En esta misma gráfica se unen los datos de ambos terremotos para obtener una única función de vulnerabilidad (regresión Almería – Murcia), siendo válida ya que corresponde a una misma región. Esta función mejora las funciones obtenidas, ya que elimina errores cometidos en los levantamientos realizados.

En la Tabla 3.8, se hace un resumen de las funciones de vulnerabilidad obtenidas para Almería y Murcia, y la obtenida uniendo los datos de Almería y Murcia. La regresión polinomial en los tres casos fue de orden 3, considerando que era suficiente para ajustar los datos y para poder comparar los resultados con la función obtenida por Yépez, 1996.

Zona de estudio	Función obtenida	Coefficiente de correlación (%)
Almería	$D = 0.03I_v - 0.000503I_v^2 + 0.00000276I_v^3$	$R^2 = 89.70$
Murcia	$D = 0.5501I_v - 0.0157I_v^2 + 0.0002I_v^3$	$R^2 = 76.43$
Almería – Murcia	$D = 0.1723I_v - 0.0046I_v^2 + 0.0001I_v^3$	$R^2 = 83.81$

Tabla 3.8. Funciones de vulnerabilidad de edificios de mampostería no reforzada para una intensidad de VII en la escala MSK.

En esta tabla se puede observar que el coeficiente de correlación entre las funciones de vulnerabilidad de Almería y Murcia varían entre ellas en un 17%, sin embargo al obtener un función de los datos en conjunto este error se reduce. Probablemente estas diferencias pueden formar parte de los rangos de error, por lo que la decisión de unir los datos en una base única permite obtener una función más real. En total la base de datos con la que se generó esta última función fue de 48, el doble que los utilizados en la función de Almería o en la de Murcia.

3.5 Resumen

En este capítulo se hizo una revisión de algunas metodologías existentes para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras. Algunas de estas metodologías forman parte de códigos o programas de mitigación de desastres, como son el ATC-21, el

propuesto por la Organización de Estados Americanos ó inclusive el método de vulnerabilidad sísmica. Sin embargo, el objeto de la descripción de estas metodologías es mostrar la importancia que tiene la evaluación de la calidad estructural, en los estudios de Riesgo Sísmico, sin hacer una clara comparación entre ellos. No obstante, se hace una completa descripción de la metodología del índice de vulnerabilidad, ya que es la que se implementará en este trabajo. Esta metodología también, se utilizó para obtener nuevos datos de vulnerabilidad y daño como consecuencia del terremoto de Mula en 1999, con lo que se actualiza y mejora la primera función de vulnerabilidad obtenida en los terremotos de Almería en 1993 y 1994

No obstante y atendiendo a que las curvas de Yépez, (1996) fueron obtenidas a partir de la simulación de un gran número de edificios con características típicas de la ciudad de Barcelona, en este trabajo se utilizarán las curvas simuladas para elaborar los escenarios sísmicos, concretamente:

- a) Para los edificios de mampostería no reforzada el índice de vulnerabilidad se calculará evaluando los 11 parámetros de la Tabla 3.6 y sustituyéndolos en la ecuación 3.6. Una vez obtenido el valor del índice los escenarios de daño para un terremoto de cierta intensidad se obtendrán aplicando la ecuación 3.8, con los correspondientes coeficientes de la Tabla 3.7.
- b) Para los edificios de hormigón armado el índice de vulnerabilidad se calculará evaluando los 11 parámetros de la Tabla 3.8 y sustituyéndolos en la ecuación 3.9. Una vez obtenido el valor del índice los escenarios de daño para un terremoto de cierta intensidad se obtendrán aplicando la ecuación 3.10, con los correspondientes coeficientes de la Tabla 3.7.

