

Capítulo 1

METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICIOS: UN ESTADO DEL CONOCIMIENTO

Reyes Indira Herrera¹ Juan Carlos Vielma¹ y Lluís G. Pujades²

¹Departamento de ingeniería estructural, Decanato de Ingeniería Civil, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado UCLA, Barquisimeto, Venezuela y Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí Ecuador (email jcvielma@ucla.edu.ve y jcvielma@espe.edu.ec)

²Universidad Politécnica de Cataluña, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos Barcelona, España (email alex_barbat@upc.edu lluis.pujades@upc.edu)

1 INTRODUCCIÓN

Los terremotos de los siglos XX y XXI han causado aproximadamente 1,8 trillones de dólares en daños globales Daniell [1]. La mayoría de las pérdidas debidas a terremotos tiene su origen en el deficiente comportamiento de los edificios que sufren daños o incluso el colapso [2]. Los daños en edificios ocasionados por terremotos evidencian la vulnerabilidad en las construcciones tradicionales de las poblaciones, tales como la construcción con mampostería, adobe y concreto armado de mala calidad. Dicha vulnerabilidad es un factor interno de riesgo de un edificio expuesto a terremotos que refleja su predisposición intrínseca de ser dañado [3, 4]. Es notable que un número considerable de los edificios dañados por terremotos fueran proyectados con normas y técnicas constructivas vigentes para la época. Este comportamiento deficiente es lo que ocasiona la mayor parte de las pérdidas de vidas humanas. A fin de acentuar lo expuesto anteriormente, en la Figura 1, se presentan los terremotos históricos ocurridos en los últimos 40 años en América y los daños globales ocasionados. El aumento poblacional, combinado con el desarrollo del país y las buenas prácticas constructivas, permite esperar una disminución de la vulnerabilidad y, por ende, la preservación de la vida y la protección de los activos financieros.

La ocurrencia de catástrofes por eventos naturales como los terremotos, han requerido la formulación de modelos conceptuales y de metodologías de estimación de pérdidas por terremoto en zonas urbanas. Sin embargo, la frecuencia de los eventos catastróficos es baja por lo que los datos históricos disponibles en cada zona sísmica son limitados y la evaluación del riesgo sísmico debe ser prospectiva, mediante modelos capaces de predecir

los futuros escenarios partiendo de la información limitada existente. Las bases para desarrollar tales modelos las deben sentar la sismología y la ingeniería sísmica, partiendo de la peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo sísmicos. Las grandes incertidumbres involucradas en todos los pasos del proceso requieren un tratamiento probabilista del problema de evaluación del riesgo [5, 6- 7]. La aplicación de estos modelos de pérdidas a un entorno edificado o a líneas vitales es de importancia también para las autoridades nacionales en cuanto a la planificación de respuesta de emergencia y desastres [8]. Asimismo, permite reajustar los códigos sísmicos para el proyecto de nuevos edificios y para proyectar sistemas de refuerzo mediante la realización de estudios costo/beneficio para diferentes tipos de intervención estructural.

La ocurrencia de los fenómenos sísmicos es inevitable debido a su naturaleza, lo que requiere mejoras que optimicen el comportamiento sismo-resistente de las estructuras nuevas y el refuerzo de las existentes, de tal forma que se reduzcan las pérdidas producidas por los terremotos en el momento que ocurren. De aquí la necesidad apremiada de los estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico, a fin de realizar una gestión integral del riesgo [9]. Considerando lo expuesto, se presenta un estado del conocimiento, referido a aspectos relacionados con la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras, destacando las metodologías de evaluación y técnicas más relevantes aplicadas recientemente para evaluar la vulnerabilidad sísmica y el daño estructural [10, 11, 12, 13, 14, 15].

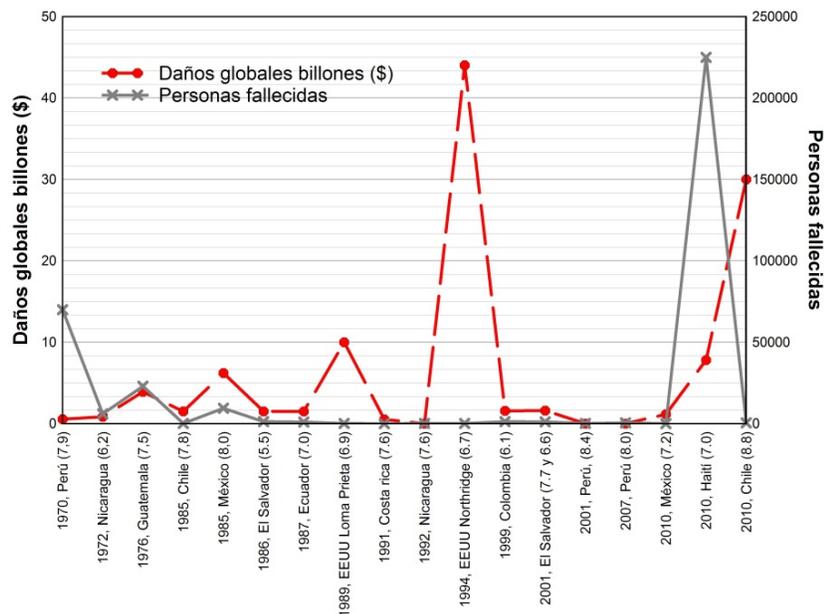


Figura 1. Pérdidas de vidas humanas y materiales por terremotos históricos ocurridos en América (1970-2010)

2 LA VULNERABILIDAD DE EDIFICIOS

El concepto de vulnerabilidad puede utilizarse no solo para describir aspectos estructurales, sino también para describir aspectos no estructurales, funcionales, operativos, o sociales, entre otros [16]. En este sentido, es necesario aclarar el tipo de afectación o daño que se considera en la evaluación de vulnerabilidad.

La vulnerabilidad estructural, se produce cuando los edificios se construyen mediante proyectos y materiales que son insuficientes para resistir a las tensiones extremas (por ejemplo, fuertes vientos, presiones hidrostáticas, o sacudidas sísmicas) Lindell *et al.* [17] y, como los fenómenos sísmicos están aún fuera del alcance de la predicción, se requiere avances en el campo de la ingeniería sísmica incluso modificaciones en las normas de proyecto sismo-resistente.

El concepto de vulnerabilidad ha sido ampliamente desarrollado en diferentes investigaciones. De acuerdo con la definición más aceptada, la *vulnerabilidad física* es la propensión de un sistema a sufrir daños debido a su interacción con procesos externos e internos, potencialmente peligrosos. Es una propiedad relativa de los sistemas, lo que significa que el grado de vulnerabilidad depende del tipo de amenaza a la que esté expuesto el sistema. En este sentido, un sistema puede ser más vulnerable a un fenómeno que a otro. Por el contrario, la *vulnerabilidad social* es el grado de daños que pueden sufrir, debido a cierta amenaza, las comunidades humanas asentadas en un lugar específico, en función de un conjunto de factores socioeconómicos, psicológicos y culturales [18]. En la referencia [19] se muestra que la vulnerabilidad puede definirse como un factor de riesgo interno de un elemento expuesto a eventos de peligro, y corresponde a su predisposición intrínseca a ser afectado o ser susceptible de sufrir daños. En otras palabras, la vulnerabilidad física, económica, política o de sensibilidad social, es la predisposición de una comunidad a sufrir daños en el caso de que ocurra un evento de amenaza de origen natural o antropogénico. La vulnerabilidad socio-económica determina el carácter selectivo de los efectos asociados a un mismo evento sobre distintas comunidades.

Por otra parte, la *vulnerabilidad sísmica* puede definirse de manera cualitativa la predisposición de una categoría de elementos en riesgo de sufrir efectos adversos causados por terremotos potenciales [20]. Para que a partir de esta definición, que es sin duda genérica, se puedan plantear instrumentos operativos de evaluación útiles para para diversos fines, como el desarrollo de escenarios de riesgo sísmico del terremoto, o de estrategias de mitigación de riesgos, se necesitan precisar varios detalles como:

- La caracterización de los elementos en riesgo.
- La caracterización de la acción sísmica y la cuantificación de su intensidad. La peligrosidad o amenaza es un peligro latente o a un factor de riesgo externo de un elemento expuesto que puede ser expresado como la probabilidad de ocurrencia de un evento de cierta intensidad, en un sitio específico y para un período determinado de exposición [21].
- La caracterización de los posibles efectos del terremoto y la cuantificación del riesgo.
- La caracterización de la predisposición de que puedan aparecer efectos de diferentes niveles de riesgo en diferentes elementos expuesto dela misma zona, es decir, de la vulnerabilidad.

En la referencia [22] se muestra que un estudio de vulnerabilidad requiere que se defina su naturaleza y alcance, lo cual está condicionado por varios factores, tales como: el tipo de daño que se pretende evaluar, el nivel de amenaza existente en la zona, la información disponible sobre las estructuras y los datos relacionados con los daños observados durante sismos que han afectado la zona de interés. Una vez definidos estos factores, el objetivo de

los estudios de vulnerabilidad es determinar el daño esperado en una estructura, en un grupo de estructuras o en toda una zona urbana, suponiendo que llegue a ocurrir un sismo de determinadas características [23]. Conocido el daño esperado, se buscan soluciones para reducirlo y lograr disminuir en gran medida las pérdidas que pudiese ocasionar un futuro terremoto. Estas soluciones repercutirán en un coste económico, el cual se podrá contrastar con los costes de las pérdidas esperadas. Sin embargo, la decisión de realizar inversiones de mejora y reforzamiento de dichas estructuras no se toma solo en función de un criterio de beneficio-coste sino también de criterios socio-económicos. Por este motivo, los estudios de vulnerabilidad sísmica constituyen, conjuntamente con los estudios de amenaza o peligrosidad, uno de los factores determinantes del *riesgo sísmico específico*, el cual representa la probabilidad total de que una estructura sufra varios niveles de daño durante un periodo específico de tiempo.

En relación a estos conceptos, Cardona y Barbat [24], presentan algunas definiciones relacionadas con el riesgo definido con la Ecuación (1), como una función de convolución (\otimes) entre la peligrosidad H_i y la vulnerabilidad V_e durante un período de exposición T

$$R_{ie|T} = f (H_i \otimes V_e)|_T \quad (1)$$

Las variables que involucradas en esta ecuación son:

El riesgo, $R_{ie|T}$, definido como probabilidad de pérdida (social, económica y ambiental) de un elemento expuesto e como consecuencia de la ocurrencia en un área determinada de un evento peligroso con intensidad mayor o igual a i durante un período de exposición T .

La amenaza o peligrosidad, $H_{i|T}$, definida como la probabilidad de ocurrencia de un evento con intensidad mayor o igual a i durante un período de exposición T .

La vulnerabilidad, V_e , es la predisposición intrínseca de un elemento expuesto e a ser afectado o ser susceptible de sufrir una pérdida como resultado de la ocurrencia de un evento de intensidad i .

3 CLASIFICACIÓN DE MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE ESTRUCTURAS

En principio, la vulnerabilidad sísmica de edificios dentro de un área urbana puede evaluarse a partir del análisis mediante modelos numéricos del daño sísmico de estructuras, de la inspección de edificios existentes o de pruebas de laboratorio. Es aquí donde se hace necesario distinguir entre la *vulnerabilidad observada*, que significa la vulnerabilidad que ha sido obtenida de la inspección de los daños posteriormente a un terremoto y del análisis estadístico de los mismos para algún tipo definido de estructura y la *vulnerabilidad calculada*, que es la vulnerabilidad que ha sido obtenida a partir de un análisis mediante un modelo estructural o mediante ensayos en el laboratorio de modelos reducidos y cuyos resultados han sido expresados en términos probabilistas [23, 25]. Los modelos de evaluación que se presentan en las siguientes secciones se encuentran enmarcados dentro de algunos de estos enfoques.

En el área de Ingeniería Sísmica han sido propuestos diferentes esquemas de clasificación para sistematizar los métodos y técnicas de evaluación de la vulnerabilidad

sísmica, con el objetivo de predecir el daño debido a un sismo con la menor incertidumbre posible. Sin embargo, éstos difieren debido a las diferentes niveles de dependencia de los siguientes factores: naturaleza y objetivo de la evaluación, la calidad y disponibilidad de la información, las características de los edificios inspeccionados, la escala de evaluación, los criterios de la metodología, el grado de fiabilidad de los resultados esperados y el uso por el usuario final de la información producida [23, 26, 27, 28, 29], las cuales se presentarán brevemente.

3.1 Clasificación de acuerdo a Corsanego y Petrini

Una de las clasificaciones más reconocida y completa sobre la evaluación de la vulnerabilidad sísmica se debe a Corsanego y Petrini [28] y se realiza en función del tipo de resultado que produce. *Técnicas directas*. Permiten predecir directamente, y en una sola etapa, el daño causado por un sismo a partir de dos métodos: i) *tipológicos*, que clasifican los edificios en clases dependiendo de los materiales, técnicas de construcción, características de construcción y otros factores que influyen en la respuesta sísmica del edificio. Definen la vulnerabilidad como la probabilidad de una estructura de sufrir un cierto nivel de daño para una intensidad sísmica definida. La evaluación de la probabilidad de daño se hace con base en los daños observados y registrados después de los terremotos anteriores, y también en el conocimiento experto. Los resultados obtenidos con este método deben ser considerados en términos de su precisión estadística, ya que se basan en investigación de campo sencilla. En efecto, los resultados son válidos sólo para el área evaluada, o para otras áreas de la tipología de construcción similar y el mismo nivel de riesgo sísmico. Ejemplos de este método son las funciones de vulnerabilidad y matrices de probabilidad de daños (MPD) desarrollados por Whitman *et al.* [30]. ii) *mecánicos*, que predicen el efecto sísmico en la estructura mediante el uso de modelos mecánicos adecuados. Dentro de estos métodos pueden distinguirse dos grupos que están relacionados con el tipo de modelo utilizado para representar la estructura, es decir, los basados en modelos simples y aquellos basados en un análisis más detallado. Respecto al primero, debe permitir analizar un gran número de edificios en un periodo de tiempo corto, y que sólo requiera unos pocos parámetros de entrada. Un ejemplo de este método fue desarrollado por Calvi [31] y aplicado a la ciudad de Catania. Los del segundo grupo son generalmente utilizados para la evaluación de estructuras individuales, debido a que requieren análisis detallados y modelos refinados; no son adecuados para la evaluación de escenarios sísmicos, donde es necesario disponer de la vulnerabilidad de un gran número de estructuras. Los dos procedimientos de análisis más utilizados en este tipo de métodos son: 1) el análisis lineal (estático y dinámico) y 2) el análisis no lineal (estático y dinámico). Un ejemplo de los más conocidos que involucran procedimientos de análisis estático no lineal son el método del espectro de capacidad (MEC) desarrollado por Freeman *et al.* [32], el cual ha sido incorporado en el ATC-40, (ATC, 1996)[33]; el método del coeficiente de desplazamiento utilizado en el FEMA 273 y 356 (FEMA, 1996; FEMA, 2000)[34, 35]; y el método N2 desarrollado por Fajfar [36], el cual ha sido implementado en el Eurocódigo 8 [37].

Técnicas indirectas. Determinan, como primer paso un índice de vulnerabilidad, para luego relacionar el daño con la intensidad sísmica, mediante estudios post-terremoto y estudios estadísticos. Es muy útil para evaluaciones sísmicas de edificios a gran escala. Un ejemplo de esta técnica es el método del índice de vulnerabilidad (IVM) GNDT [38] y

propuesto por Benedetti y Petrini [39], con motivo de los estudios post-terremoto realizados en Italia. Con base en una asignación de puntajes se encuentra la técnica de selección rápida del ATC-21 [40], ampliamente utilizada en los EE.UU. para obtener una puntuación de la vulnerabilidad.

Técnicas convencionales. Son esencialmente heurísticas e introducen un índice de vulnerabilidad independientemente de la predicción del daño. Se usan básicamente para comparar la vulnerabilidad relativa de diferentes construcciones de una misma tipología, ubicadas en una determinada zona, de acuerdo con algunos factores cuya contribución a la resistencia sísmica es calibrada por expertos. Los índices dan una medida relativa de la vulnerabilidad, pero los resultados obtenidos son difíciles de comparar para diferentes tipos de construcciones, debido a las diferencias existentes entre los factores considerados. Existen básicamente dos grupos de métodos: los primeros califican empíricamente las diferentes características físicas de las estructuras; los segundos consideran los criterios utilizados en las normativas de proyecto sismo-resistente, evaluando la relación demanda/capacidad de los edificios de manera simplificada [41, 42, 43]. El método de ATC-13 [44], que se enmarca dentro de esta categoría, utiliza matrices de probabilidad de daño partiendo de la opinión de expertos; el grado de incertidumbre se asume como una limitación tratada a través del procesamiento probabilístico. Aunque este método no permite la introducción de nuevos datos o su aplicación a otros edificios y regiones, ha sido ampliamente utilizado en muchos estudios de vulnerabilidad sísmica en las últimas décadas. Otro ejemplo perteneciente a esta categoría es el método HAZUS FEMA [45, 46]. Este método utiliza los desplazamientos y aceleraciones espectrales como medida de la intensidad sísmica y emplea la subjetividad relativa de la opinión de expertos para la clasificación de daños para 36 tipos de modelos estructurales. Para cada tipo de construcción y nivel de diseño, utiliza parámetros que permiten definir la capacidad de la estructura, las derivas máximas de entrepiso y, finalmente, los desplazamientos espectrales en los umbrales de los diferentes estados de daño considerados.

Técnicas híbridas. Combinan las características de los métodos descritos anteriormente, tales como las funciones de vulnerabilidad sobre la base de la vulnerabilidad observada y juicios de expertos. Regularmente, la vulnerabilidad se define en clases según la escala macrosísmica EMS-98 [47]. Este es el caso del modelo macrosísmico y mecánico propuesto por Lagomarsino y Giovinazzi [48], que combina las características de los métodos tipológicos y técnicas indirectas. La vulnerabilidad de los edificios está definida mediante curvas de vulnerabilidad y capacidad por el método macrosísmico y mecánico, respectivamente, y, posteriormente, mediante un cruce validado de ambas.

Considerando las diferentes técnicas descritas anteriormente, Vicente *et al.* [27] mencionan que la definición y la naturaleza de los criterios de análisis (cualitativo y cuantitativo) condicionan naturalmente la formulación de las metodologías y su correspondiente nivel de evaluación, que puede variar de la evaluación rápida de los edificios basados en la observación visual a la elaboración de modelos numéricos más complejo de edificios individuales (véase la Figura 2).

3.2 Clasificación de acuerdo con Dolce *et al.*

Dolce *et al.* [29] han propuesto un criterio de clasificación que examina separadamente las etapas fundamentales que comprende un análisis de vulnerabilidad: los datos de

entrada, el método empleado y los resultados obtenidos; incluso es posible obtener diferentes combinaciones de estas etapas (ver Figura 3). Con respecto a los métodos, la clasificación considera tres tipos que se presentarán brevemente a continuación.

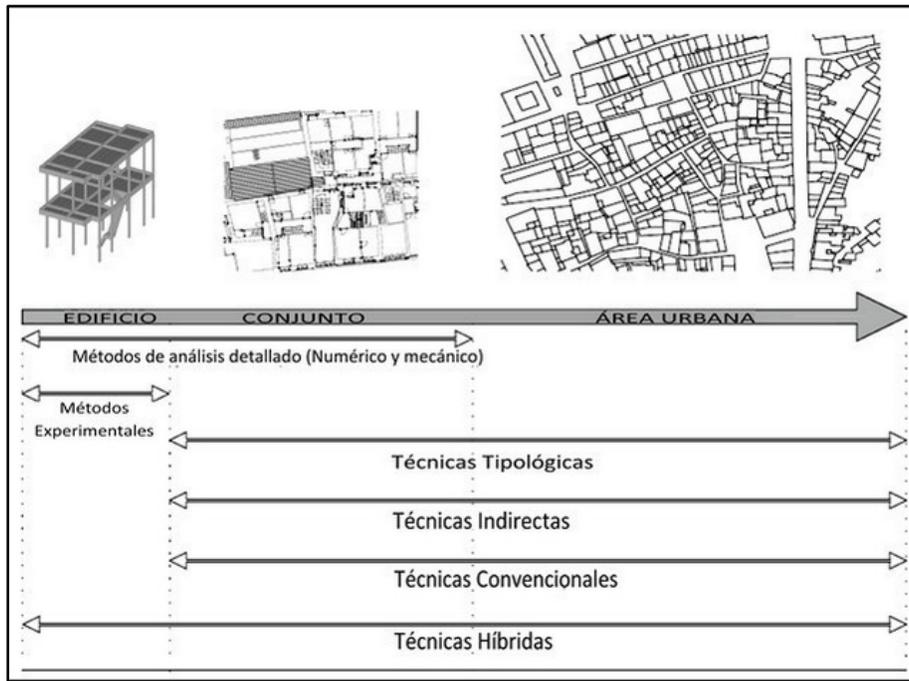


Figura 2. Técnicas de análisis de evaluación de la vulnerabilidad [27]



Figura 3. Clasificación de las técnicas de evaluación de la vulnerabilidad, [29].

Métodos estadísticos. Con base en un análisis estadístico de las construcciones, caracterizadas por los datos de entrada, la evaluación de la distribución del daño se realiza a partir de la observación y cuantificación estadística de los daños ocasionados por sismos pasados (vulnerabilidad observada).

Métodos mecánicos ó analíticos. Utilizan modelos mecánicos para predecir el daño de la estructura por medio de algún parámetro que describe el comportamiento de la edificación frente a un sismo, como puede ser la deriva máxima entrepiso, la ductilidad, o un índice de daño (vulnerabilidad calculada).

Métodos con base en juicio de expertos. Evalúan cualitativa y/o cuantitativamente los factores que gobiernan la respuesta sísmica de los edificios.

3.3 Clasificación de acuerdo a Calvi *et al.*

Otro enfoque sobre cómo caracterizar las metodologías de análisis de vulnerabilidad ha sido desarrollado por Calvi *et al.* [49]. Los autores resaltan que el objetivo de una evaluación de vulnerabilidad sísmica es obtener la probabilidad de que un determinado tipo de edificio sufra un determinado nivel de daño bajo un sismo de una determinada severidad. Los diferentes métodos que se han propuesto en el pasado para evaluar la vulnerabilidad de las estructuras se pueden dividir en *métodos empíricos* y *métodos analíticos*; ambos pueden ser considerados *métodos híbridos*, tal como se muestra en la Figura 4, y se discuten brevemente más adelante.

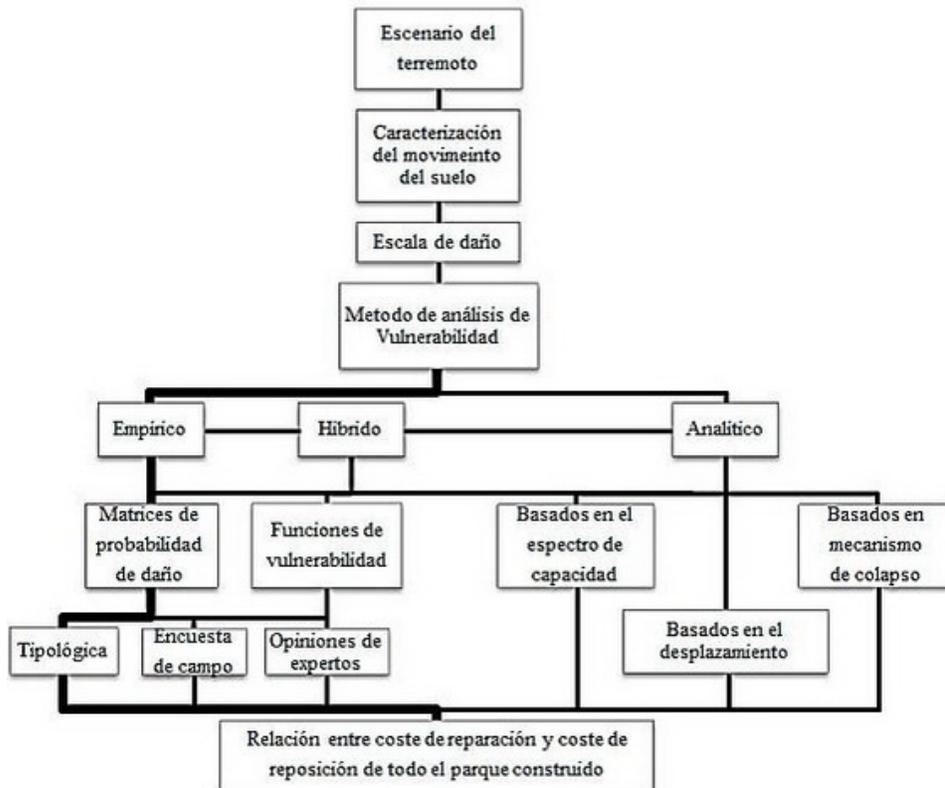


Figura 4. Componentes de una evaluación de riesgo sísmico y métodos para evaluar la vulnerabilidad (resaltado el método tradicional), [30]

De forma general, los métodos de análisis de la vulnerabilidad cuantifican el daño mediante una determinada escala, que suele adoptar valores discretos. Ejemplos de uso frecuentes incluyen la escala MMI (Wood y Neumann, 1931) [50], la escala MSK [51], y la escala EMS [47]. Cuando se emplean métodos empíricos para evaluar la vulnerabilidad, la escala de daño está basada en observaciones y consideraciones estadísticas. Cuando se

usan métodos analíticos, la escala de daño suele estar relacionada con propiedades mecánicas de la estructura asociadas a estados límite tales como la capacidad de desplazamiento lateral

3.4 Los métodos empíricos/estadísticos

Son métodos de evaluación de la vulnerabilidad sobre la base de datos de los daños observados. Estos métodos se han empleado para definir la vulnerabilidad de estructuras existentes desde la década de 1970. Muchos de ellos sólo utilizan la intensidad macrosísmica o PGA en lugar de las ordenadas espectrales, lo que ha creado una gran dispersión de los resultados; por lo tanto, son enfoques razonables y posibles que pueden ser inicialmente empleados en los análisis de riesgos sísmicos a gran escala [1, 49].

Por otro lado, estos métodos se caracterizan por un alto grado de subjetividad, con un enfoque menos exigente pero que son más económicos de implementar [26]. Entre los inconvenientes de estos enfoques se encuentra la falta de datos (terremotos de magnitud alta), así como su imposibilidad de evaluar las consecuencias físicas de las diversas características de los elementos expuestos de una manera precisa y directa.

Hay dos tipos principales de métodos empíricos para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de una determinada tipología de edificios (*vulnerability class*) que se basan en los daños observados después de los terremotos¹) Las matrices de probabilidad de daño (MPD) que expresan en una forma discreta la probabilidad condicional de que una estructura sufra un nivel un nivel de daño j , dado un sismo con un nivel de intensidad i

$$P[D = j|i] \quad (2)$$

2) Las funciones de vulnerabilidad, que son relaciones gráficas o matemáticas que expresan en forma continua la vulnerabilidad en función de algún parámetro que describa el nivel de intensidad del sismo.

3.5 El método de Matrices de Probabilidad de Daño (MPD)

Una de las primeras aplicaciones de este tipo de métodos fue el trabajo realizado por Whitman *et al.* [30]. A partir de un levantamiento de daños causados por el sismo de San Fernando en 1971, cubriendo aproximadamente 1600 construcciones de 5 o más niveles, se generaron matrices de probabilidad de daño para cada tipo de construcción. La forma general de estas matrices se muestra en la Tabla 1. Cada número en la matriz expresa la probabilidad que una construcción de una determinada clase experimente un nivel de daño por causa de una intensidad sísmica dada. El daño se obtiene como la relación entre el costo de reparación y el costo de reposición. Este tipo de método se encuentra dentro de las técnicas directas presentada por Corsanego y Petrini [28], puesto que establece una relación directa entre la tipología de la construcción y el daño observado. Asimismo, una de las primeras versiones europeas de la matriz de probabilidad de daño que fue la introducida por Braga *et al.* [52] y, posteriormente, por Di Pasquale *et al.* [53] presentaron una propuesta para actualizar la versión original.

Las MPD basada en la opinión de expertos se introdujeron por primera vez en el ATC-13 [25], elaborado por FEMA para evaluar daños sísmicos causados por terremotos en California. En FEMA se incluye un total de 78 matrices de probabilidad de daño correspondientes a diferentes tipos de instalaciones y servicios, 40 de los cuales

corresponden a edificios.

Giovinazzi y Lagomarsino [45] desarrollaron el método macrosísmico a partir de la definición proporcionada por la escala EMS-98 y haciendo uso de una distribución de daños beta y la teoría de conjuntos difusos (es decir, la evaluación progresiva de la composición de los elementos en un conjunto). Propusieron un *Índice de Vulnerabilidad Empírico* que toma en cuenta la región, el patrimonio inmobiliario y las clases para la producción de MPD relacionados con el parque de viviendas. Recientemente, Eleftheriadou *et al.* [54] realizaron un estudio de evaluación empírica sobre la base de encuestas de 180.945 edificios dañados en el terremoto de Atenas en 1999, clasificándolos en tipos de especificaciones estructurales, de acuerdo con los materiales, normas sismo-resistente y técnicas de construcción en el sur de Europa, obteniendo las MPD y las curvas de fragilidad para tipos de edificaciones.

Tabla 1. Formato de la matriz de probabilidad de daño para una tipología dada.[14]

Estado Daño	Daño estructural	Daño no estructural	Relación de daño	Intensidad del sismo				
				V	VI	VII	VIII	IX
0	Ninguno	Ninguno	0 - 0.05	-	-	-	-	-
1	Ninguno	Menor	0.05 - 0.3	-	-	-	-	-
2	Ninguno	Localizado	0.3 - 1.25	-	-	-	-	-
3	No notable	Generalizado	1.25 - 3.5	-	-	-	-	-
4	Menor	Sustancial	3.5 - 4.5	-	-	-	-	-
5	Substancial	Amplio	7.5 - 20	-	-	-	-	-
6	Mayor	Casi Total	20 - 65	-	-	-	-	-
7	Edificio inutilizable		100	-	-	-	-	-
8	Colapso		100	-	-	-	-	-

3.6 El método del índice de vulnerabilidad (IVM)

Es otro procedimiento relativamente simple basado en datos empíricos y clasificados como una técnica indirecta. El método ha sido desarrollado en Italia donde se dispone de una gran base de datos de información de los daños, obtenidos mediante encuestas de campo después de un terremoto [38, 39]. Estos investigadores utilizaron los datos obtenidos mediante inspección para realizar una calificación de la calidad del proyecto y construcción sismo-resistente de los edificios mediante un coeficiente denominado *índice de vulnerabilidad* (I_v) que incorpora parámetros que controlan el daño causado por la acción sísmica.

El método relaciona el índice de vulnerabilidad obtenido, con el grado de daño global d que sufre la estructura, a través de funciones de vulnerabilidad para cada grado de intensidad macrosísmica del terremoto o para diferentes niveles de aceleración máxima (PGA), tal como se muestra en la Figura 5. Este factor de daño d varía entre 0 y 1 y se define como la relación entre el coste de reparación y el coste de reposición.

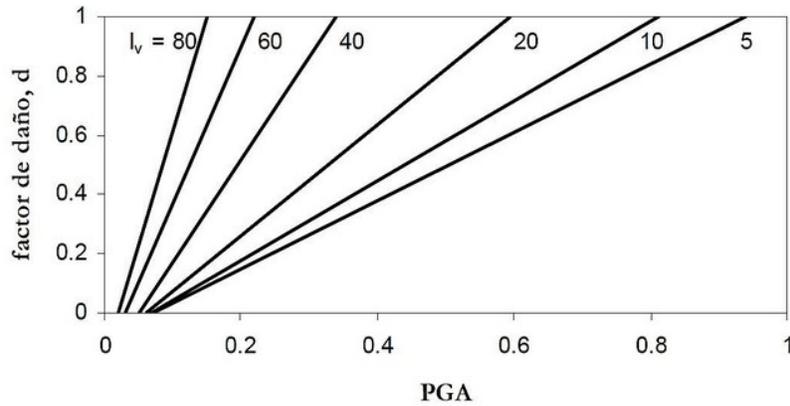


Figura 5. Funciones de vulnerabilidad para diferentes valores del índice de daño. [30].

Se utiliza un total de 11 parámetros a evaluar en la calificación de los edificios tanto de mampostería simple como concreto armado. Los valores de los coeficientes de calificación aplicados, K_i , varían según las condiciones de calidad desde A (óptimo) hasta D (desfavorable) que, a su vez, se ponderan mediante un factor W_i para dar cuenta de su importancia relativa [25]. El índice global de vulnerabilidad de cada edificio, se evalúa utilizando la siguiente formulación:

$$I_v = \sum_{i=1}^{11} K_i W_i \quad (3)$$

Una diferencia y ventaja del método del índice de vulnerabilidad respecto al método de las matrices de probabilidad de daño es que permite caracterizar la vulnerabilidad de un edificio o grupo de edificios similares dentro una misma tipología (mediante I_v), en vez de utilizar una definición de vulnerabilidad general para toda la tipología.

El enfoque del índice de vulnerabilidad fue adaptado e incorporado como el método del nivel I de las dos metodologías aplicadas dentro del proyecto Europeo RISK-UE [55, 56], donde se evaluó la vulnerabilidad sísmica y se determinaron escenarios de riesgo sísmicos para 7 ciudades de Europa, caracterizadas por diferentes niveles de sismicidad: Barcelona (España), Bucarest (Rumania), Catania (Italia), Sofía (Bulgaria), Bitola (Yugoslavia), Tesalónica (Grecia) y Niza (Francia).

3.7 El método de las curvas continuas de vulnerabilidad

De naturaleza empírica, se desarrolló utilizando los daños observados en edificios sometidos a terremotos; se planteó poco después del método MPD; un obstáculo para la obtención de estas curvas es el hecho de que la intensidad macrosísmica no es una variable continua. Este problema fue resuelto por Spence *et al.* (1992) [57], a través del uso de una escala de parámetros de intensidad para obtener las funciones de vulnerabilidad basada en el daño observado en edificios utilizando la escala de daño MSK (véase la Figura 6).

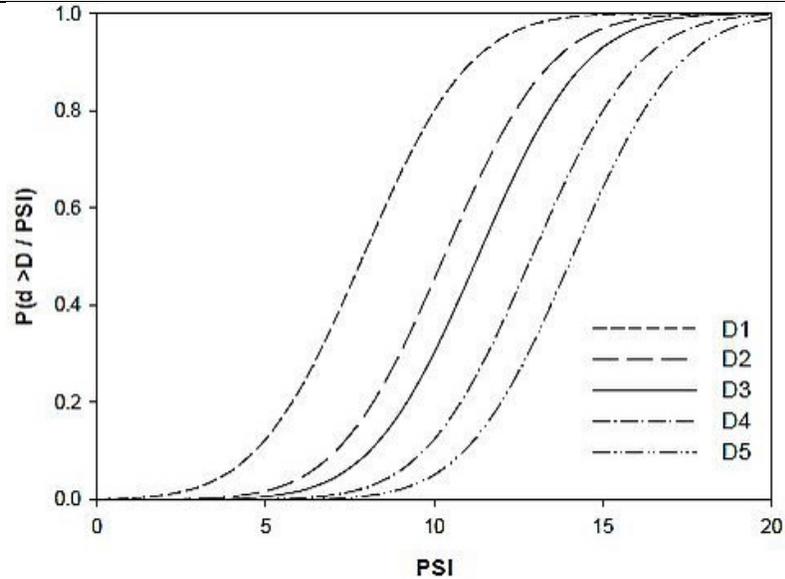


Figura 6. Curvas de vulnerabilidad de [38] para pórticos de concreto armado utilizando el PSI y MSK.

Otras alternativas de curvas de vulnerabilidad empíricas con base en la observación de daños post-terremoto han sido propuestas para superar inexactitudes o calibrar los resultados obtenidos con métodos analíticos y/o ensayos de laboratorio, en donde el movimiento del terreno se caracteriza con la velocidad máxima del terreno (PGV) [58].

3.8 Métodos de selección

Este método permite evaluar rápidamente el comportamiento sísmico de edificios sobre la base de los resultados correlacionados. El método del índice sísmico japonés (JSIM) propuesto por JBDPA [59], plantea tres niveles o procedimientos de selección que dependen de la complejidad y de fiabilidad, para estimar el comportamiento sísmico de un edificio. El comportamiento sísmico de una construcción se representa por un índice sísmico, I_S , que debe ser calculado para cada planta del pórtico y en cada dirección del edificio mediante la siguiente ecuación:

$$I_S = E_o * S_D * T \quad (4)$$

donde, E_o es un descriptor del comportamiento básico estructural, S_D es un parámetro relativo a la concepción estructural de la construcción y T es otro parámetro que está relacionado con la edad del edificio. Para estimar E_o es necesario encontrar el producto del índice de resistencia de los elementos verticales C con el índice de ductilidad F de los mismos elementos, teniendo en cuenta el modo de fallo del edificio, el número de plantas y la posición de la planta estudiada. El coeficiente S_D tiene en cuenta la influencia de la distribución de resistencia, rigidez y masas entre las plantas del edificio. Una vez obtenido el índice I_S , éste debe compararse con un índice de referencia I_{so} (índice de fallo sísmico) para determinar si el edificio puede considerarse seguro frente a un determinado nivel de terremoto.

Diversos son los procedimientos de evaluación rápida que se han planteado. El método de selección de seguridad sísmica (SSSM) propuesto por Ozdemir *et al.* [60] para evaluar la vulnerabilidad edificios en Turquía, es una adaptación del método (JSIM) con una

misma concepción de energía equivalente y, con base en levantamientos de edificios dañados por terremotos, plantea un índice de evaluación de la vulnerabilidad (I_s). Por otro lado, Hassan y Sozen [61] proponen la evaluación de edificios de baja altura de concreto armado definiendo un índice de prioridad, en función de la superficie de las paredes, los paneles de relleno, las columnas y el piso, mientras que Yakut [62] establece un índice de capacidad, a partir de considerar la configuración estructural y parámetros secundarios. Por otro lado, la propuesta de Bal *et al.* [63], como una técnica de puntuación rápida para identificar las estructuras vulnerables a colapso, llamado P25-Método de ponderación, evalúa parámetros estructurales importantes que afectan la respuesta sísmica de edificios y establece factores de ponderación. Bajo una misma concepción de evaluación rápida Thermou y Pantazopoulou [64] proponen índices de evaluación rápida de la vulnerabilidad sísmica de edificios de concreto armado en función del área de miembros verticales, la demanda y capacidad de desplazamiento de entrepiso, considerando relaciones entre la rigidez de la columna y la translación de la pared y el refuerzo transversal disponible y la carga axial de elementos verticales.

El procedimiento del ATC-21 [40] tiene un enfoque de diagnóstico rápido para obtenerla vulnerabilidad de los edificios en EEUU; posteriormente, con un sistema de puntuación más actualizado, se incluye en FEMA 154 [65]. Describe un procedimiento rápido para identificar aquellos edificios que puedan suponer un grave riesgo de pérdida de vidas y lesiones, o de los servicios comunitarios, en caso de un terremoto. Utiliza una metodología basada en una "encuesta de campo", enfoque que consiste en la identificación del sistema resistente estructural primario y su material de construcción, y la asignación de una puntuación básica de riesgos estructurales y los modificadores de rendimiento con base en las características de construcción observadas.

3.9 Los métodos mecánicos e híbridos

Estos métodos se basan en principios de la mecánica estructural, permiten caracterizar con algoritmos de evaluación de vulnerabilidad detallados y transparentes el significado físico directo y calibran directamente las características de los edificios existentes y la amenaza [49]. Utilizan principalmente el análisis no lineal consideran la degradación de rigidez de los edificios existentes [1] y se usan preferiblemente para estudios individuales de vulnerabilidad debido al considerable esfuerzo computacional involucrado. No obstante, pueden ser utilizados en estudios paramétricos para la planificación urbana, soluciones de reacondicionamiento sísmico y otras políticas o iniciativas similares.

Cualquiera que sea la complejidad de los modelos, una comparación con las observaciones de daños es importante para la validación. Esta comparación puede no ser fácil en la práctica, en particular debido a las incertidumbres relativas a los movimientos del terreno y debido a la falta de datos o de la subjetividad en los juicios de expertos. Los modelos híbridos se pueden encontrar en aquellos casos en los que métodos empíricos y analíticos se combinan con las observaciones (por ejemplo, Kappos *et al.* [66]) y los procedimientos específicos de calibración pueden ser utilizados para desarrollar los modelos estructurales evitando, al mismo tiempo, el esfuerzo computacional excesivo. Los modelos híbridos pueden ser especialmente ventajosos cuando hacen falta datos de daño para ciertos niveles de intensidad sísmica en la zona geográfica en consideración, y permiten también la calibración de los modelos analíticos que se emplean en las simulaciones numéricas.

3.10 Curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño (MPD) obtenidas analíticamente

Aunque las curvas de fragilidad y las matrices de probabilidad de daño se han obtenido a partir de los daños observados después de los terremotos, en los últimos años se ha propuesto utilizar el análisis computacional y con ello optimizar algunos de los inconvenientes de los métodos empíricos. La Figura 7, adaptada de la referencia [67], resume las componentes básicas que se necesitan para obtener analíticamente las curvas de fragilidad o las matrices de probabilidad del daño.

Singhal y Kiremidjian [68] desarrollaron un enfoque sistemático para la estimación de las curvas de fragilidad o vulnerabilidad y matrices de probabilidad de daño (MPD) para diferentes sistemas estructurales, aplicando un método de análisis dinámico no lineal. El nivel de movimiento del terreno en el caso de las curvas de fragilidad se caracteriza por la aceleración espectral y por la intensidad de Mercalli modificada en el caso de las MPD. Determinaron las probabilidades asociadas a los diferentes estados de daño mediante la simulación por Monte Carlo y analizaron tres tipos diferentes de estructuras de concreto armado calculando el índice de daño de Park y Ang [69] para identificar los diferentes grados de daño. Luego desarrollaron curvas analíticas de fragilidad para estructuras de concreto armado utilizando procedimientos de simulación por Monte Carlo y actualizaron estas curvas de fragilidad utilizando la respuesta de edificios ante cargas sísmicas observadas en el terremoto de Northridge en 1994.

Masi [70] empleó un procedimiento para caracterizar la vulnerabilidad sísmica de diferentes tipos de edificios porticados de concreto armado construidos en Italia de acuerdo con las normas italianas y las prácticas de la época de construcción. Estimó la respuesta sísmica de los mismos sometidos a terremotos históricos y artificiales de diferente nivel de intensidad. La vulnerabilidad se caracterizó mediante el uso de la escala EMS-98. El estudio de Dumova-Jovanoska [67] generó curvas de vulnerabilidad y matrices de probabilidad de daño para edificios de concreto armado construidos en la región de Skopje. Las relaciones entre el daño sísmico y la intensidad se obtuvieron modelando analíticamente edificios representativos de concreto armado y realizando cálculos dinámicos con 240 terremotos sintéticos. El daño en las estructuras se midió con el índice de daño Park y Ang [69]. Para la probabilidad de ocurrencia del daño se adoptó una distribución normal.

De acuerdo con el enfoque de Rossetto y Elnashai [71] se construyen curvas de capacidad a partir del empuje incremental adaptativo (*adaptive pushover*) de edificios europeos y utilizando la metodología del espectro de capacidad para obtener el punto de capacidad por demanda (*performance point*), el cual se correlaciona con un estado de daño a través de una escala calibrada con datos experimentales. Los autores repitieron este procedimiento utilizando espectros de aceleración-desplazamiento para varios registros de movimientos sísmicos y la variabilidad en las características estructurales de los edificios se modeló utilizando un método de superficie de respuesta, lo que condujo a la obtención de curvas analíticas de vulnerabilidad con base en desplazamientos.

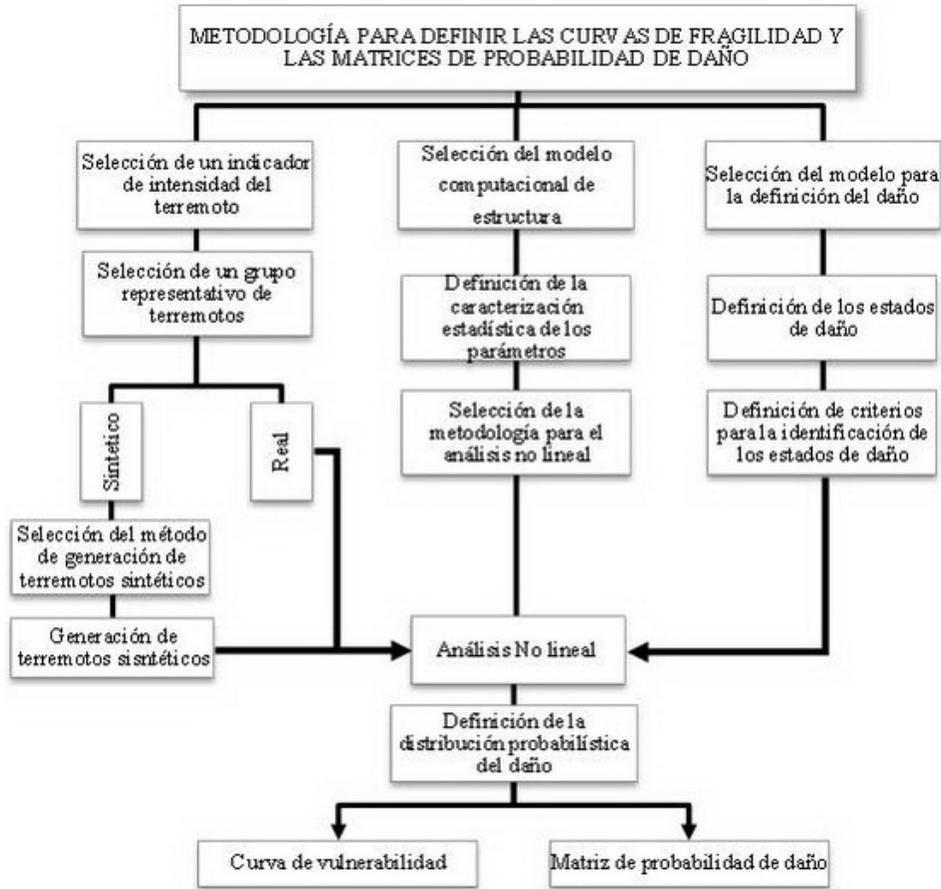


Figura 7. Componentes del cálculo de las curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño con métodos analíticos [48].

Ellingwood *et al.* [72] desarrollaron curvas de fragilidad para edificios de acero y concreto armado en el centro y este de los EEUU, donde los edificios están sujetos a los niveles de cargas sísmicas de bajos a moderados. Asumieron que la curva de fragilidad sigue una distribución log-normal y utilizaron para su estimación el enfoque FORM que considera tanto las fuentes aleatorias y de incertidumbre epistémica de la capacidad estructural. Por tanto, las fragilidades sísmicas de los pórticos se desarrolla usando modelos estocásticos simples de la demanda sísmica y la capacidad estructural. En el estudio de Vielma *et al.* [73] se aplicó un procedimiento de análisis no lineal de estructuras de concreto armado basado en el control de fuerzas que considera un índice de daño calculado mediante elementos finitos. La respuesta estática no lineal es obtenida para tres edificios proyectados para diferentes niveles de ductilidad, obteniéndose umbrales de daño mediante el análisis de la evolución de la deriva relativa de piso respecto al desplazamiento del nivel de techo. Dichos umbrales de daño se utilizan en la determinación de las curvas de fragilidad aplicando la distribución log-normal y las matrices de probabilidad de daño para cinco estados de daño.

Mediante un procedimiento híbrido, por su combinación de datos estadísticos de observación en campo con análisis no lineal, Kappos *et al.* [74] calcularon matrices de probabilidad de daño (MPD) para edificios en Grecia, mediante un modelo analítico relacionado con índices de daños estructurales y calibrados con datos estadísticos

disponibles. Obtuvieron curvas de capacidad y de vulnerabilidad en términos de aceleración máxima del suelo (PGA) así como del desplazamiento espectral, para edificios de concreto armado.

Michel *et al.* [75] proponen un modelo de evaluación de vulnerabilidad para daños leves con base en parámetros modales experimentales. Desarrollaron dos metodologías completas para la creación de curvas de fragilidad: utilizando un sistema MDOF que incluye los modos superiores de vibración y movimientos sísmicos y utilizando un sistema SDOF teniendo en cuenta el modo fundamental de vibración de la estructura y espectros de respuesta de desplazamiento. Estos dos métodos se aplicaron a la ciudad de Grenoble, donde estudiaron 60 edificios con tipologías que variaron entre mampostería y concreto. Consideraron un escenario sísmico específico del sitio según un terremoto con condiciones locales; el modelo es limitado para regiones de alta sismicidad. Otros aspectos de interés pueden verse en [76, 77].

3.11 Método basado en el espectro de capacidad

Es una técnica de análisis sísmico con base en comportamiento desarrollado inicialmente por Freeman *et al.* [16]; luego fue adoptado y modificado como un procedimiento de análisis no lineal estático por el ATC-40 y FEMA 440 [33, 78] e implementando en la metodología HAZUS. El MEC establece procedimientos simples para determinar el punto de capacidad por demanda (*performance point*) de una estructura cuando está sometida a movimientos sísmicos de diferente intensidad. Mediante un procedimiento gráfico se compara la capacidad para resistir fuerzas laterales con la demanda sísmica, representada por medio de un espectro de respuesta reducido, lo que significa la superposición de los espectros de capacidad y de demanda en un sistema cartesiano de formato ADRS (espectro de respuesta en aceleraciones - espectro de respuesta en desplazamientos), tal como se muestra en la Figura 8.

El espectro de capacidad es obtenido a partir de un análisis estático no lineal con empuje incremental (*pushover*). Utilizando un enfoque mecánico simple, la estructura es sometida a una carga estática lateral que se representa por un modelo de un solo grado de libertad; además, se caracteriza la demanda sísmica inicial mediante un espectro de respuesta elástica $S_{ae}(T)$ que se convierte al sistema cartesiano de formato S_a-S_d . El punto de intersección de los espectros de capacidad y de demanda es el punto de máxima solicitud de la capacidad de la estructura por parte de la demanda a que se ve sometida (punto de capacidad por demanda). El ATC-40 contiene tres técnicas específicas para su determinación.

La metodología HAZUS (Hazard US) fue desarrollada para estimar las pérdidas potenciales debidas a terremotos [27, 26]. Originalmente, incluye seis módulos diferentes como se muestra en la Figura 9: (1) estimación de la peligrosidad sísmica; (2) realización de un inventario de edificios y su clasificación; (3) evaluación de la vulnerabilidad, es decir, cálculo del daño físico directo para cada clase de edificio y para cada nivel de peligrosidad, (4) daño físico por inundaciones; (5) las pérdidas directas económicas/sociales; (6) pérdidas económicas indirectas evaluadas a largo plazo. La evaluación de la vulnerabilidad del módulo (3) se realiza mediante el MEC del ATC-40; las curvas de fragilidad están representadas por funciones de distribución log-normal y se definen para cuatro estados límite de daños.

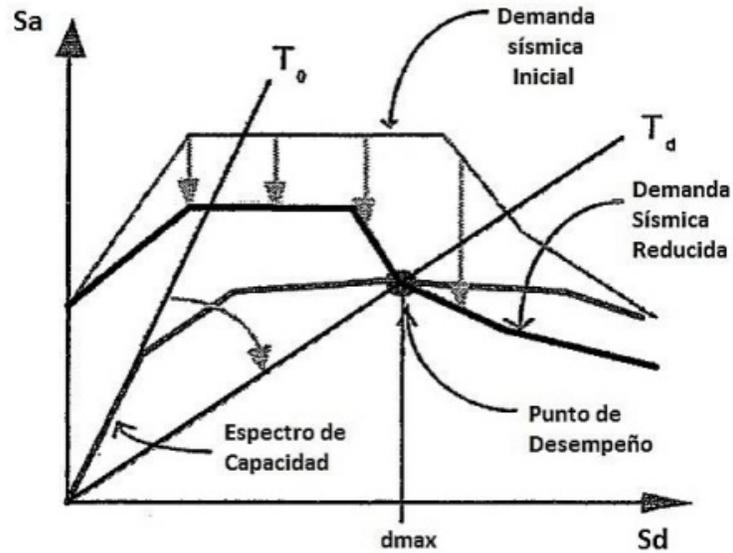


Figura 8. MEC para determinar el punto de capacidad por demanda

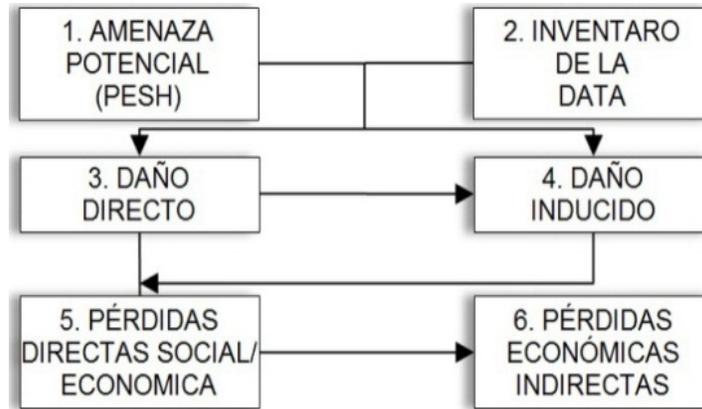


Figura 9. Módulos de HAZUS.

Giovinazzi [79] desarrolló un procedimiento mecánico basado en desplazamiento para evaluar pórticos de concreto armado y mampostería mediante una curva de capacidad que convirtió al formato S_a-S_d . Desarrolló espectros de capacidad para diferentes tipologías de edificios, utilizando el método del espectro de capacidad (MEC); sin embargo, los umbrales de desplazamiento los obtuvo con base en juicio de expertos. En el análisis de edificios prototipos utilizó las funciones de fragilidad del modelo de HAZUS. Además utilizó una distribución binomial para modelar la distribución de daños de acuerdo con Braga *et al.* [52], que simplifica el procedimiento [49].

3.12 Método basado en desplazamiento

Existe un método de evaluación de la vulnerabilidad con base en desplazamientos propuesto por Priestley [80] y desarrollado por Priestley *et al.* [81]; en este método se propone emplear el desplazamiento como indicador fundamental del daño y una representación espectral de la demanda sísmica. Es conocido también como método directo

de diseño basado en desplazamiento (*Direct Displacement Based Design DDBD*), donde la respuesta de una estructura de múltiples grados de libertad se representa mediante un sistema de un grado de libertad equivalente a un oscilador con una masa efectiva (m_e). La curva fuerza-desplazamiento bilineal de la estructura se caracteriza en términos de rigidez efectiva o secante (K_e) en del desplazamiento máximo (Δ_d).

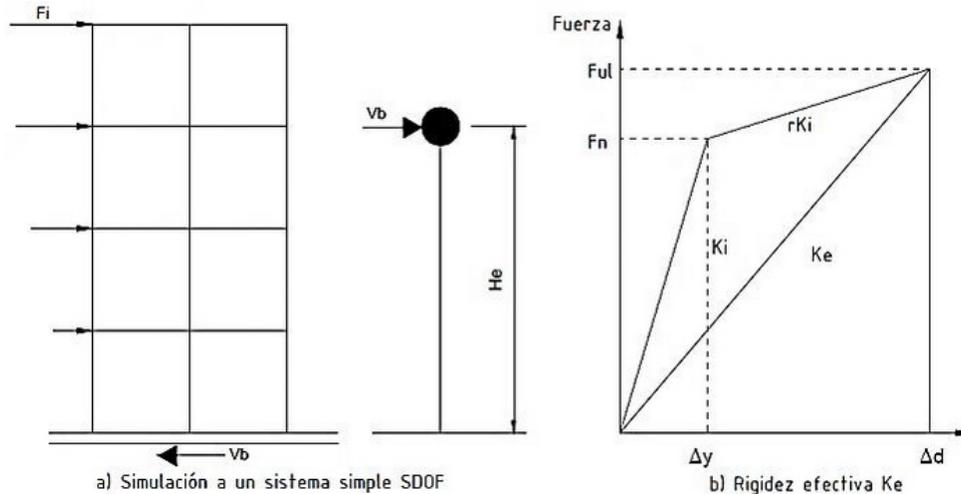


Figura 10. Fundamentos del DDBD, simulación de la estructura en SDOF y rigidez efectiva K_e . [60]

El método contempla que para un nivel de ductilidad de demanda se calcule un amortiguamiento viscoso equivalente, representativo de la combinación del amortiguamiento elástico e histéretico de la energía absorbida durante la respuesta elástica. Con el desplazamiento de diseño determinado para la respuesta máxima y el correspondiente amortiguamiento estimado a partir de la ductilidad de demanda esperada, se obtiene el periodo efectivo (T_e) de un grupo de espectros de proyectos expresados en desplazamiento. Esta fuerza de proyecto de la estructura equivalente se distribuye en la estructura real y se dimensiona la estructura; a partir de aquí, se realiza un análisis estático no lineal para verificar que el amortiguamiento de partida se satisface dentro de una tolerancia aceptable (véase la Figura 10). Una versión refinada del enfoque DDBD propuesta por Calvi [31], para edificios de concreto armado en Europa, denominado DBELA, se ha propuesto recientemente [82].

En otro contexto, considerando la importancia de algunas técnicas de evaluación expuesta con anterioridad, se han aplicado 7 técnicas de evaluación de daño en Ugel *et al.* [83], en donde se expone la aplicación de las técnicas, se realiza un análisis comparativo y se dan conclusiones sobre la implementación las mismas.

4 CONCLUSIONES

La revisión hecha de algunas de las más importantes contribuciones en el campo de la evaluación de la vulnerabilidad de las últimas décadas, no ha incluido todas las técnicas y procedimientos de estimación de pérdidas, ya que son muy variados y no se clasifican fácilmente en cualquiera de las categorías consideradas en este capítulo.

Los métodos de evaluación de la vulnerabilidad clasificados como estadísticos y la observación de los daños son adecuados para el análisis a gran escala, fundamentalmente por dos razones: requieren menos información y menos recursos. Los métodos disponibles

en la actualidad y la simplificación de los modelos analíticos todavía requieren la validación mediante ensayos experimentales. Sin embargo, las incertidumbres asociadas con las curvas de vulnerabilidad empírica y la calidad de los datos de clasificación de vulnerabilidad siguen siendo temas que deben ser estudiados con mayor profundidad, más aún en lo que respecta a la recolección de datos sísmicos.

En su revisión sobre metodologías de evaluación de vulnerabilidad Calvi *et al.* [49] concluyen que una metodología de evaluación de vulnerabilidad óptima o ideal debería tener las siguientes características principales: i) incorporar los eventos más recientes a la evaluación del riesgo sísmico; ii) calcular de forma explícita todas las fuentes de incertidumbre; iii) el modelo debe ser fácilmente adaptable a las prácticas de construcción de cualquier país y permitir incluir nuevos tipos de edificios; iv) debe lograrse un equilibrio entre el esfuerzo computacional y la cantidad de datos detallados que se requiere. Sin embargo, es improbable que se pueda desarrollar una metodología única capaz de cumplir con todos estos requisitos.

No obstante, la mitigación de los efectos adversos debido a terremotos y la reducción de la vulnerabilidad de las edificaciones es una prioridad. Por lo tanto, el desarrollo de modelos más fiables de evaluación de vulnerabilidad que combinen los métodos de analíticos y estadísticos debería conducir a mejores resultados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores están especialmente agradecidos con el Consejo de Investigación (CDCHT) de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. El segundo autor agradece a la Senescyt (Ecuador) a través del proyecto Becas Prometeo, en cuyo contexto se ha editado este Capítulo. De igual manera a la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE) por el apoyo brindado para la preparación de esta monografía. También queremos expresar nuestro agradecimiento al Mid-American Earthquake Center y la National Science Foundation (premio número CEE-9701785), los desarrolladores del software Zeus NL utilizados en esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] Daniell James. (2009). *Comparison and Production of Open Source Earthquake Loss Assessment Packages*, European School For Advanced Studies In Reduction Of Seismic Risk, Tesis de Magister, Italia.
- [2] Barbat A.H. (1998). *El riesgo sísmico en el diseño de edificios*, Calidad Siderúrgica, Madrid.
- [3] Barbat A.H., Lagomarsino S. y Pujades L.G. (2006). Vulnerability assessment of dwelling buildings, in *Assessing and managing earthquake risk*, C. Sousa, X. Goula and A. Roca editors, 115-134, Springer.
- [4] Barbat A.H., Carreño M.L., Cardona O.D. y Marulanda M.C. (2011). Evaluación holística del riesgo sísmico en zonas urbanas, *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 27(1), 3-27.

- [5] Cardona O.D., Ordaz M.G., Marulanda M.C. y Barbat A.H. (2008a). Estimation of probabilistic seismic losses and the public economic resilience-An approach for macroeconomic impact evaluation, *Journal of Earthquake Engineering*, 12(S2), 60-70.
- [6] Carreño M.L., Cardona O.D. y Barbat A.H. (2012). New methodology for urban seismic risk assessment from a holistic perspective, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(2), 547-565.
- [7] Birkmann J., Cardona O.D., Carreño M.L., Barbat A.H., Pelling M., Schneiderbauer S., Kienberger S., Keiler M., Zeil P. y Welle T. (2013). Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework, *Natural Hazards*, 67(2), 193-211.
- [8] Carreño M. L., Cardona O.D. y Barbat A.H. (2011). Evaluación de la habitabilidad de edificios afectados por sismo utilizando la teoría de conjuntos difusos y las redes neuronales artificiales, *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 27(4), 278-293.
- [9] Cardona O.D., Ordaz M.G. Yamín L.E., Marulanda M.C. y Barbat A.H. (2008b). Earthquake loss assessment for integrated disaster risk management, *Journal of Earthquake Engineering*, 12(S2), 48-59.
- [10] Oller S., Luccioni B. y Barbat A.H. (1996). Un método de evaluación del daño sísmico en pórticos de hormigón armado, *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 12(2), 215-238.
- [11] Barbat A.H. y Bozzo, L.M. (1997). Seismic analysis of base isolated buildings, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 4(2), 153-192.
- [12] Oller S. y Barbat A.H. (2006). Moment-curvature damage model for bridges subjected to seismic loads, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195, 4490-4511.
- [13] Faleiro J., Oller S. y Barbat A.H. (2008). Plastic-damage seismic model for reinforced concrete frames, *Computers and Structures*, 86(7-8), 581-597.
- [14] Mata P., Barbat A.H., Oller S. y Boroschek R. (2008). Constitutive and geometric nonlinear models for the seismic analysis of RC structures with energy dissipators, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 15, 489-539.
- [15] Faleiro J., Oller S. y Barbat A.H. (2010). Plastic-damage analysis of reinforced concrete frames, *Engineering Computations*, 27(1), 57-83.
- [16] Marulanda M.C., Cardona O.D. y Barbat A.H. (2010). Revealing the socioeconomic impact of small disasters in Colombia using the DesInventar database, *Disasters*, 34(2), 552-570.
- [17] Lindell M., Prater C. y Perry R. (2007). *Introduction to Emergency Management*, 1ra Edition.
- [18] CEPAL. (2005). *El impacto de los desastres naturales en el desarrollo: Documento metodológico básico para estudios Nacionales de caso*, Informe L-64, México.
- [19] Barbat A., Carreño M., Pujades L., Lantada N., Cardona O. y Marulanda M. (2010).

- Seismic vulnerability and risk evaluation methods for urban areas. A review with application to a pilot area. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6 (1-2), 17-38.
- [20] Sandi H., Pomonis A., Francis S., Georgescu E., Mohindra R. y Borcia I. (2008). Development of a nationwide seismic vulnerability estimation system, *Constructii*, 1, 28-47.
- [21] Egozcue, J. J., Barbat A.H., Canas, J. A., Miquel J. y Banda, E. (1991). A method to estimate occurrence probabilities in low seismic activity regions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 20(1), 43-60.
- [22] Lantada N., Irrizari J., Barbat A.H., Goula, X., Roca A., Susagna T. y Pujades L.G. (2010). Seismic hazard and risk scenarios for Barcelona, Spain, using the Risk-UE vulnerability index method, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8, 201-229.
- [23] Yépez F., Barbat A.H. y Canas J. (1996). Simulación de escenarios de daño sísmico en zonas urbanas, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño de la Ingeniería*, 12(3), 331-358.
- [24] Cardona O. y Barbat A. (2000). *El riesgo sísmico y su prevención*. Cuadernos técnicos, Ed. C.S. S.R.L. 5, 190 p. Madrid.
- [25] Barbat A.H., Mena U. y Yépez F. (1998). Evaluación probabilista del riesgo sísmico en zonas urbanas, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 14 (2), 247-268
- [26] Safina S. (2003). *Vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales. Análisis de su contribución al riesgo sísmico*, Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica, Tesis doctoral. Barcelona, España.
- [27] Vicente R., Parodi S., Lagomarsino S., Varum H. y Mendes J. (2011). Seismic vulnerability and risk assessment: case study of the historic city centre of Coimbra, Portugal, *Bull Earthquake Engineering*, 9, 1067-1096
- [28] Corsanego A. y Petrini V. (1990) *Seismic vulnerability of buildings*. In: *Proceedings of the SEISMED 3*. Trieste, Italia.
- [29] Dolce M., Kappos A., Zuccaro G. y Coburn A. (1994). Report of the EAEE working group 3: vulnerability and risk analysis, *Technical Report 10th european conference on Earthquake Engineering*. Vienna, 4, 3049–3077
- [30] Whitman R., Reed J. y Hong S. (1973). Earthquake Damage Probability Matrices, *Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering*, Roma, Italia, 2, 2531-2540
- [31] Calvi G. (1999). A displacement-based approach for vulnerability evaluation of classes of buildings, *Journal of Earthquake Engineering*, 3(3), 411 - 438
- [32] Freeman S., Nicoletti J. y Tyrell J. (1975). Evaluations of existing buildings for seismic risk—A case study of Puget Sound Naval Shipyard, Bremerton, Washington, *Proceedings of 1st U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, EERI, Berkeley, U.S.A, 113-122.
- [33] ATC (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*, ATC-40, Seismic

- Safety Commission, SSC Rep. 96-01, 1-2, California, U.S.A.
- [34] FEMA (1996). *NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 273)*, Federal Emergency Management Agency, Washington DC, U.S.A.
- [35] FEMA (2000). *Prestandard and commentary for the Seismic rehabilitation of buildings (FEMA 356)*, Federal Emergency Management Agency, Washington DC, U.S.A.
- [36] Fajfar P. (2000). Nonlinear analysis method for performance based seismic design. *Earthquake Spectra*, EERI, United States of America, 16(3), 573-591.
- [37] CEN (2004). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. EN 1998-1:2004*, Brussels, Belgium.
- [38] GNDT (1993). *Rischio Sismico di edifici Pubblici-Parte I Aspetti Metodologici*. CNR - Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti. Roma, Italia.
- [39] Benedetti D. y Petrini V. (1984). Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura i proposte di un metodo di valutazione. *L'industria delle Costruzioni*, 149, 66-74.
- [40] ATC (1988). *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook*, ATC-21, Applied Technology Council, California, U.S.A.
- [41] Barbat A.H. (1982). *Cálculo sísmico de estructuras*, Editores Técnicos Asociados, Barcelona.
- [42] Barbat A.H. y Miquel Canet J. (1989). *Structural Response Computations in Earthquake Engineering*, Pineridge, Swansea, U.K.
- [43] Bozzo L. y Barbat A.H. (2000). *Diseño sísmico de edificios, Técnicas convencionales y avanzadas*, Editorial Reverté S.A., Barcelona.
- [44] ATC (1985). *Earthquake Damage Evaluation Data for California*, ATC-13, Applied Technology Council, California, U.S.A.
- [45] NIBS (1999). *HAZUS 99 Technical Manuals*, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C, U.S.A.
- [46] FEMA (2003). *HAZUS-MH Technical Manual*, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C, U.S.A.
- [47] Grünthal G. (1998). *European Macroseismic Scale 1998 - EMS-98*, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. 15, Luxemburgo.
- [48] Lagomarsino S. y Giovinazzi S. (2006). Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings, *Bull Earthquake Engineering*, 4, 415-443
- [49] Calvi G., Pinho R., Magenes G., Bommer J., Restrepo L. y Crowley, H. (2006). Development of Seismic Vulnerability Assessment Methodologies over the Past 30 Years, *ISET Journal of Earthquake Technology*, Paper No. 472, 43(3), 75-104.
- [50] Wood H. y Neumann F. (1931). Modified Mercalli intensity scale of 1931, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 21(4), 277-283.

- [51] Medvedev S., Sponheuer W. y Karnik, V. (1965). *Seismic intensity scale version MSK 1964*, UNESCO, Report WS/0565.43 AVS, Paris, 1-7
- [52] Braga F., M. Dolce y D. Liberatore (1982). A statistical study on damaged buildings and ensuing review of the MSK-76 scale. *Proceedings of Seventh European Conference on Earthquake Engineering*, Athens.
- [53] Di Pasquale G., Orsini G. Romeo R.W. (2005). New Developments in Seismic Risk Assessment in Italy, *Bull Earthquake Engineering*, 3(1), 101–128.
- [54] Eleftheriadou A. y Karabinis A. (2011). Development of damage probability matrices based on Greek earthquake damage data, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 10(1), 129-141.
- [55] Milutinovic Z. y Trendafiloski G. (2003). *RISK-UE. An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. WP4: Vulnerability of current buildings*. RISK-UE – EVK4-CT-2000-00014
- [56] Mouroux P., Bertrand E., Bour M., Le Brun B., Depinois S. y Masure Philippe, (2004). The European RISK-UE Project: An Advanced Approach To Earthquake Risk Scenarios, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 3329.
- [57] Spence R., Coburn A. y Pomonis A. (1992). Correlation of Ground Motion with Building Damage: The Definition of a New Damage-Based Seismic Intensity Scale, *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, España, 1, 551-556.
- [58] Yamaguchi N. y Yamazaki F. (2000). Fragility Curves For Buildings In Japan Based On Damage Surveys After The 1995 Kobe Earthquake, *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, paper. 2451.
- [59] JBDPA. (1977). *Standard for Seismic Capacity Assessment of Existing Reinforced Concrete Buildings*, Japanese Building Disaster Prevention Association, Ministry of Construction, Tokyo, Japan.
- [60] Ozdemir P., Boduroglu M. e Ilki A. (2005). Seismic Safety Screening Method, *Proceedings of the International Workshop on Seismic Performance Assessment and Rehabilitation of Existing Buildings (SPEAR)*, Ispra, Italy, Paper No. 23.
- [61] Hassan A. y Sozen M.A. (1997). Seismic Vulnerability Assessment of Low-Rise Buildings in Regions with Infrequent Earthquakes, *ACI Structural Journal*, 94(1), 31-39.
- [62] Yakut A. (2004). Preliminary Seismic Performance Assessment Procedure for Existing RC Buildings, *Engineering Structures*, 26(10), 1447-1461.
- [63] Bal I., Tezcan S. y Gulay F. (2006). Advanced applications of the P25 scoring method for the rapid assessment of R/C buildings, *Proceedings of 1st ECEES*, 3–8, Genova, Switzerland, Paper: 67.
- [64] Thermou G. y Pantazopoulou S. (2011). Assessment Indices For The Seismic Vulnerability Of Existing R.C. Buildings, *Earthquake Engineering And Structural Dynamics*. 40, 293–313.

- [65] ATC. (2002). *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook*, Federal Emergency Management Agency, FEMA 154, 2da Edición, Washington, D.C.
- [66] Kappos A. y Panagopoulos G. (2010). Fragility curves for reinforced concrete buildings in Greece, *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance*, 6(1-2), 39-53
- [67] Dumova-Jovanoska, E. (2004). Fragility Curves for RC Structures in Skopje Region, *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, Paper No. 3.
- [68] Singhal A. y Kiremidjian A. (1998). Bayesian updating of fragilities with application to RC frames. *Journal of Structural Engineering*, 124(8), 922–929.
- [69] Park Y., Ang A. (1985). Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete, *Journal of Structural Engineering*, 111(4), 722-739.
- [70] Masi A. (2003). Seismic Vulnerability Assessment of Gravity Load Designed R/C Frames, *Bull Earthquake Engineering*, 1(3), 371-395.
- [71] Rossetto T. y Elnashai A. (2005). A New Analytical Procedure for the Derivation of Displacement-Based Vulnerability Curves for Populations of RC Structures, *Engineering Structures*, 7(3), 397-409.
- [72] Ellingwood B., Celik O. y Kinali K. (2007). Fragility assessment of building structural systems in mid-America. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 36, 1935–1952.
- [73] Vielma J.C., Barbat A. y Oller S. (2007). Curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño de edificios de concreto armado con ductilidad limitada, *Revista internacional de desastres naturales, accidentes e infraestructura civil*, 7(2), 273-286.
- [74] Kappos A.J., Stylianidis K.C. y Ptilakis K. (1998). Development of Seismic Risk Scenarios Based on a Hybrid Method of Vulnerability Assessment, *Natural Hazards*. 17(2), 177-192.
- [75] Michel C., Guéguen P., Causse, M. (2012). Seismic vulnerability assessment to slight damage based on experimental modal parameters, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41, 81–98.
- [76] Vargas Y.F., Pujades L.G. y Barbat A.H. (2013a). Evaluación probabilista de la capacidad, fragilidad y daño sísmico en edificios de hormigón armado, *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 29(2), 63-78.
- [77] Vargas Y.F., Pujades L.G., Barbat A.H. y Hurtado, J. E. (2013b). Capacity, fragility and damage in reinforced concrete buildings: a probabilistic approach, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11(6), 2007-2032.
- [78] ATC. (2005). *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*, FEMA 440, California, U.S.A.

- [79] Giovinazzi S. (2005). *The Vulnerability Assessment and the Damage Scenario in Seismic Risk Analysis*, PhD Thesis, Technical University Carolo-Wilhelmina at Braunschweig, Germany and University of Florence, Florence, Italia.
- [80] Priestley M. (1997). Displacement-based seismic assessment of reinforced concrete buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 1(1), 157-192.
- [81] Priestley M., Calvi G., Kowalski M. (2007). *Displacement-based seismic design of structures*. IUSS Press. Pavia. Italia.
- [82] Crowley H., Borzi B., Pinho R., Colombi M. y Onida M. (2008). Comparison of two mechanics-based methods for simplified structural analysis in vulnerability assessment, *Advances in Civil Engineering*. ume 2008, Article ID 438379.
- [83] Ugel R., Herrera I., Vielma J.C. y Pujades L. (2012). Análisis de escenarios de riesgo sísmico para toma de decisiones. Aplicación a edificio aporricado de concreto armado en el municipio Valencia, *Ingeniería y Sociedad UC*, 7(1), 20-34.

