

ESTADO DEL CONOCIMIENTO SOBRE METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICIOS

¹Herrera, G.Reyes; ¹Vielma, Juan C; ²Barbat, Alex H; ³Pujades, Lluís

¹ Departamento de Estructuras. Decanato de Ingeniería Civil. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Barquisimeto. Estado Lara. Venezuela.

² Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. España.

³ Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. España.

email: hreyes@ucla.edu.ve, reyes.indira.herrera@upc.edu

Resumen: Este artículo resume el trabajo realizado recientemente en relación con el desarrollo de enfoques y la creación de nuevas técnicas en la ingeniería sísmica que permiten evaluar la vulnerabilidad sísmica y estimar las pérdidas físicas después de un terremoto. Luego de presentar los esquemas de clasificaciones propuestos, se discuten los diferentes métodos o modelos de evaluación de vulnerabilidad sísmica en edificaciones de concreto armado y mampostería, y se resumen las características esenciales de cada modelo. El impacto de grandes terremotos en las estructuras o zonas urbanas, puede reducirse más no eliminarse, el conocimiento y aplicación de nuevas técnicas de estimación de pérdidas por terremotos y la acción oportuna de profesionales de la ingeniería, planificadores de emergencia, empresas aseguradoras y autoridades nacionales permitirá la mitigación de desastres causados por terremotos.

Palabras clave: Vulnerabilidad sísmica, concreto armado, mampostería, estimación de pérdidas

STATE OF KNOWLEDGE ON METHODOLOGIES OF SEISMIC VULNERABILITY ASSESSMENT OF BUILDINGS

Abstract: This article summarizes the current works done on the development of approaches and creation of new techniques in earthquake engineering which allow to assess the seismic vulnerability and to estimate physical losses after an earthquake. After presenting the proposed classification schemes, different methods or evaluation models of seismic vulnerability of reinforced concrete and masonry buildings are discussed and the key features of each model are summarized. The impact of large earthquakes on structures or on urban areas can be reduced but cannot be eliminated. The knowledge and application of new techniques of estimation of losses from earthquakes and the early action of engineering professionals, emergency planners, insurance companies and national authorities will allow the mitigation of disasters caused by earthquakes.

Key words: Seismic vulnerability, reinforced concrete, masonry, loss estimation.

INTRODUCCIÓN

Los terremotos de los siglos XX y XXI han causado aproximadamente 1,8 trillones de dólares en daños globales Daniell (2011). Estos daños en edificios ocasionados por terremotos históricos evidencian la vulnerabilidad en las construcciones tradicionales de las poblaciones, tales como la construcción con mampostería, adobe y concreto armado de mala calidad. Asimismo, es notable que un número considerable de estas edificaciones dañadas por terremotos fueran proyectadas con normas y técnicas constructivas vigentes para la época. Este comportamiento deficiente en viviendas y

edificios es lo que ocasiona las pérdidas de vidas humanas, materiales y los daños económicos que en el primer caso es irreparable; 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. Estos aspectos considerados, muestran que el aumento poblacional, combinado con el desarrollo del país y las buenas prácticas constructivas, permitirá una disminución de la vulnerabilidad y por ende la preservación de la vida y la protección de los activos financieros.

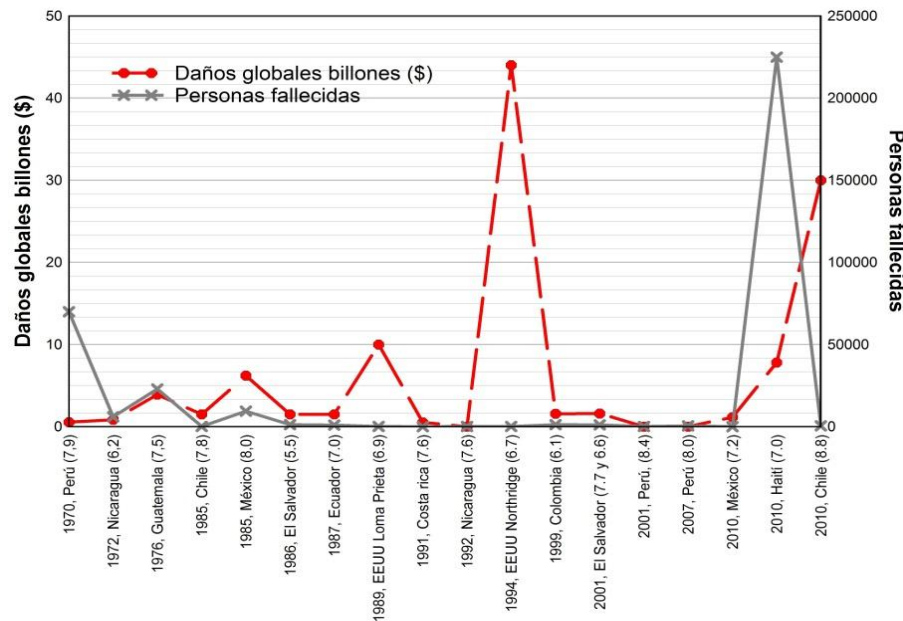


Figura 1. Pérdidas de vidas humanas y materiales por terremotos históricos ocurridos en América (1970-2010).

La existencia continua de catástrofes ocurridas por eventos naturales como los terremotos, han iniciado formulaciones de metodologías o modelos de estimación de pérdidas de daños por terremoto de zonas urbanas, que logran predecir el impacto económico de futuros terremotos, y además, la mitigación del riesgo poblacional. La aplicación de estos modelos de pérdidas a un entorno edificado o líneas vitales de

servicio son de importancia para las autoridades nacionales en cuanto a la planificación de respuesta de emergencia y desastres. Asimismo, pueden reajustar los códigos sísmicos para el proyecto de nuevos edificios y aplicarse para proyectar sistemas de reforzamiento 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 física, esto conlleva a realizar mejoras que optimicen el comportamiento sismo-resistente de las estructuras nuevas y reforzamiento de las existentes, de tal forma, que permita mitigar 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 planes de mitigación de futuros desastres naturales. 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 daño estructural.

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, entre otros. 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 en base a proyectos y materiales que son insuficientes para resistir a las tensiones extremas (por ejemplo, fuertes vientos, presiones hidrostáticas, o sacudidas sísmicas) Lindell *et al.* (2007), y como los fenómenos sísmicos están aun fuera del alcance de la predicción, se requiere avances en el campo de la ingeniería sísmica incluso modificaciones en las normas de proyectosismo-resistente.

El concepto de vulnerabilidad ha sido ampliamente desarrollado en diferentes investigaciones. La definición más aceptada de *vulnerabilidad física* indica que 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, esto significa que el grado de vulnerabilidad depende de la amenaza a la que esté expuesto el sistema. En este sentido, un sistema puede ser más vulnerable a un fenómeno que a otro, mientras que la *vulnerabilidad sociales* el grado de daños que pueden sufrir, debido a cierta amenaza, los grupos humanos asentados en un lugar específico, en función de un conjunto de factores socioeconómicos, psicológicos y culturales, CEPAL (2005); al respecto Barbat *et al.* (2010) expresan 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. Las diferencias expuestas en la vulnerabilidad social y en el contexto material determinan la severidad y el carácter selectivo de los efectos asociados a un evento en particular.

Por otra parte, Sandi *et al.* (2008) expresan una definición cualitativa de la *vulnerabilidad sísmica* como: la predisposición de una categoría de elementos en riesgo de sufrir efectos adversos causados por terremotos potenciales. Este tipo de definición, que es sin duda vaga, requiere de mejoras considerables para convertirse en un instrumento operativo para diversos fines, como la estimación del desarrollo de escenarios de riesgo sísmico del terremoto, o el desarrollo de estrategias de mitigación de riesgos. Las mejoras necesarias se refieren esencialmente a:

- ✓ La caracterización de los elementos en riesgo, que se investigarán.
- ✓ La caracterización de la acción sísmica y la cuantificación de su severidad.
- ✓ La caracterización de los posibles efectos del terremoto y la cuantificación de su severidad.
- ✓ La caracterización de la predisposición a que aparezcan efectos de diferentes niveles de severidad, como función de la acción sísmica.

Asimismo, Bonett (2003) considera que un estudio de vulnerabilidad consiste en definir 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, según Yépez *et al.* (1996), 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. Conocido el daño esperado buscar 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, para así decidir si es justificable realizar inversiones de mejora y reforzamiento de dichas estructuras. 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 (2000), presenta 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 .

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

Donde:

El Riesgo, $R_{ie|T}$, definido como probabilidad de pérdida (social, económica y ambiental) de un elemento expuesto 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 durante un período de exposición T .

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

CLASIFICACIÓN DE MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE ESTRUCTURAS

En principio, la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios dentro de un área urbana, puede proceder 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 observación de los daños posteriores a un terremoto y del análisis estadístico de los mismos para algún tipo definido de estructura y la *vulnerabilidad*

calculada, que significa la vulnerabilidad que ha sido obtenida de un análisis matemático mediante un modelo estructural o mediante ensayos en el laboratorio de modelos reducidos y cuyos resultados han sido expresados en términos probabilísticos (Yépez *et al.* 1996; Barbat *et al.* 1998), los modelos de evaluación de las siguientes secciones se encuentran enmarcados dentro de algunos de estos enfoques.

Investigadores del área de Ingeniería Sísmica, han propuesto diferentes esquemas de clasificación como un esfuerzo 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, 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. Investigaciones como la de Bonett (2003), Safina (2003) y Vicente *et al.* (2011), detallan clasificaciones importantes realizadas por Corsanego y Petrini (1990) y Dolce *et al.* (1994), las cuales se presentarán brevemente.

Clasificación de acuerdo a Corsanego y Petrini (1990)

Una de las clasificaciones más reconocida y completa sobre la evaluación de la vulnerabilidad sísmica se debe a Corsanego y Petrini (1990), agrupándolas en función del tipo de resultado que producen, como se muestra a continuación:

- *Técnicas Directas*; Permiten predecir directamente y en una sola etapa, el daño causado por un sismo, a partir de dos metodologías, i) *los métodos tipológicos* -

clasifica 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. La vulnerabilidad se define 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 basa 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.* (1973).
ii) *los métodos mecánicos* – 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 métodos analíticos basados en modelos simples y aquellos basados en un análisis más detallado. Respecto al primero debe tener la capacidad de analizar un gran número de edificaciones en un periodo de tiempo corto, y que sólo requiere de unos pocos parámetros de entrada. Un ejemplo de este método fue desarrollado por Calvi (1999) y aplicado a la ciudad de Catania. Respecto al segundo grupo, generalmente son utilizados para la evaluación de estructuras individuales, debido a que involucran análisis detallados y modelos más refinados que no son adecuados

para proyectos de escenarios sísmicos, donde es necesario evaluar 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 lineales se encuentran: el método del espectro de capacidad (MEC) desarrollado por Freeman *et al.* (1975), el cual ha sido incorporado en el ATC-40, (ATC, 1996); el método del coeficiente de desplazamiento utilizado en el FEMA 273 y 356 (FEMA, 1996; FEMA, 2000); el método N2 desarrollado por Fajfar (2000), el cual ha sido implementado en el Eurocódigo 8 (CEN, 2004).

- **Técnicas Indirectas;** Determinan un índice de vulnerabilidad como primer paso, 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 (1993) y propuesto por Benedetti y Petrini (1984), con motivo de los estudios post-terremoto realizados en Italia. Por otro lado, con base en una asignación de puntajes se encuentra la técnica de selección rápida del ATC-21 (ATC, 1988), ampliamente utilizada en los EE.UU. para obtener una puntuación de la vulnerabilidad.
- **Técnicas Convencionales;** Son esencialmente heurísticas, 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 se basan en calificar empíricamente las diferentes características físicas de las estructuras; los segundos se basan en los mismos criterios utilizados en las normativas de proyecto-sismo-resistente, evaluando la relación demanda/capacidad de los edificios de manera simplificada. El ATC-13 (ATC, 1985) es un método conocido dentro de esta categoría, contiene matrices de probabilidad de daño partiendo de la base de la opinión de los 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 la técnica de HAZUS del Instituto Nacional de Ciencias de la Construcción (NIBS) y la Agencia de Gestión Federal de Emergencias de EEUU (FEMA), (NIBS, 1999; FEMA, 2003). Este método utiliza los desplazamientos y aceleraciones espectrales como medida de la acción sísmica, 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, se dan los 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 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 (Grünthal, 1998). Este es el caso del modelo macrosísmico y mecánico propuesto por Lagomarsino y Giovinazzi (2006), que combina las características de los métodos tipológicos y técnicas indirectas. La vulnerabilidad de los edificios está definida en términos de curvas de vulnerabilidad y capacidad por el método macrosísmico y mecánico respectivamente, y posteriormente, un cruce validado de ambas.

Considerando las diferentes técnicas descritas anteriormente Vicente *et al.* (2011), 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 (Figura 2)

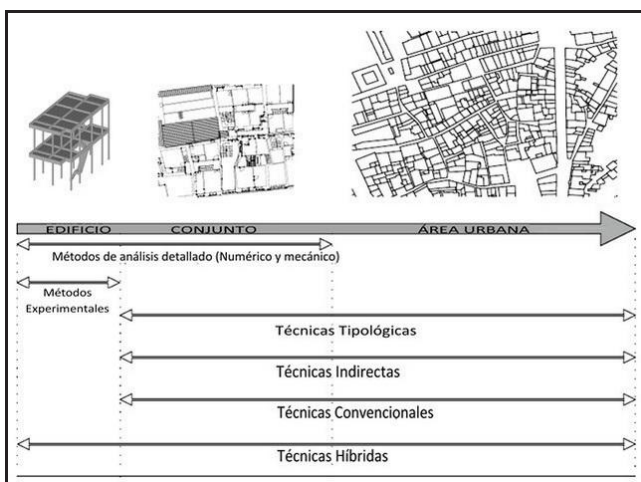


Figura 2. Técnicas de análisis de evaluación de la vulnerabilidad (Vicente *et al.* 2011)

Clasificación de acuerdo a Dolce *et al.* (1994)

Dolce *et al.* (1994), han propuesto un criterio de clasificación producto de examinar separadamente las etapas fundamentales que comprende un análisis de vulnerabilidad, como lo son: 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:



Figura 3. Clasificación de las técnicas de evaluación de la vulnerabilidad, (Dolce *et al.* 1994).

- **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 obtiene de la observación y cuantificación estadística de los daños ocasionados por sismos pasados (Vulnerabilidad observada).
- **Métodos mecánicos ó analíticos;** En los que se utilizan modelos mecánicos para predecir el daño de la estructura por medio de algún parámetro que represente 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 basados en Juicios de Expertos*; Que se evalúan cualitativa y/o cuantitativamente los factores que gobiernan la respuesta sísmica de las edificaciones, de tal forma que pueda determinar el grado de exposición al que se encuentra sometido un grupo de estructuras.

Clasificación de acuerdo a Calviet *al.* (2006)

Un enfoque novedoso sobre cómo caracterizar las metodologías de análisis de vulnerabilidad ha sido desarrollado por Calvi *et al.* (2006). 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 dos categorías: Los métodos *empíricos* y los *métodos analíticos*, ambos pueden ser empleados en *métodos híbridos*, tal como se muestra en la Figura 4, y se discuten brevemente más adelante.

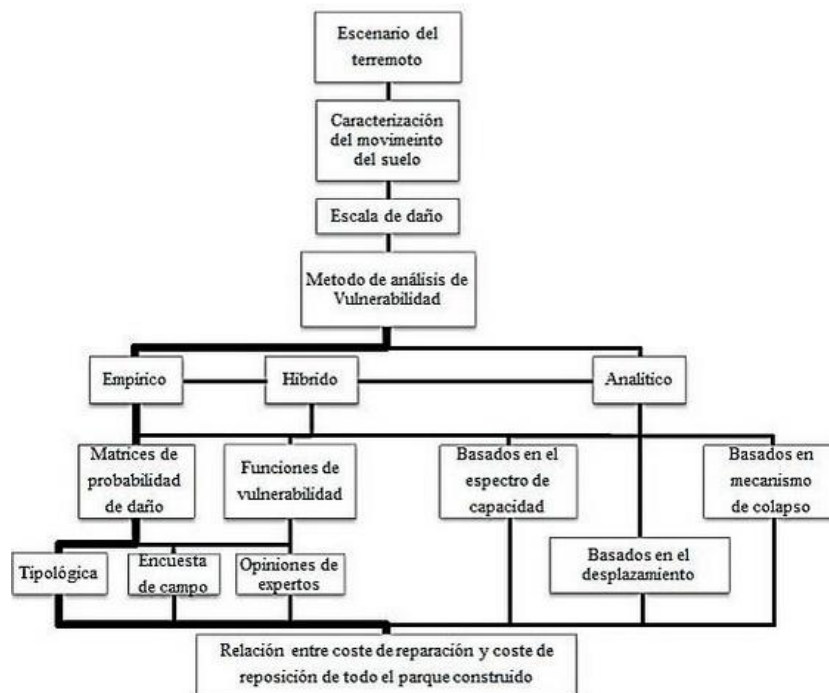


Figura 4. Componentes de una evaluación de riesgo sísmico y métodos para evaluar la vulnerabilidad (resaltado el método tradicional), (Calviet *al.* 2006).

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), la escala MSK (Medvedev *et al.* 1965), y la escala EMS (Grünthal, 1998). Cuando se emplean *métodos empíricos* para evaluar la vulnerabilidad, la

escala de daño esta 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.

- 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 estos métodos sólo utilizan 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, (Calvi *et al.* 2006; Daniell, 2009).

Por otro lado, estos métodos se caracterizan por un alto grado de subjetividad, con un enfoque menos exigente pero más económicos de implementar (Safina, 2003). 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 (edificios, etc.) de una manera precisa y directa (ENSURE, 2009).

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 terremotos, los cuales pueden ser denominados en general “relaciones de daño-movimiento del terreno”:

1) 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 severidad i :

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

2) Las funciones continuas 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 severidad del sismo.

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.* (1973). 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 N° 1. Cada número en la matriz (indicado por -) expresa la probabilidad que una construcción de una determinada clase, experimente un nivel de daño por causa de una intensidad sísmica dada. La relación de 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 (1990), 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 fue la introducida por Braga *et al.* (1982), posteriormente en Di Pasquale *et al.* (2005) 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 (ATC, 1985), elaborado por FEMA para evaluar daños sísmicos causados por terremotos en California. 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.

Asimismo, Giovinazzi y Lagomarsino (2004), 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), utilizan 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.* (2011), 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 a 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 N° 1. Formato de la matriz de probabilidad de daño para una tipología dada. (Whitman *et al.* 1973)

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	-	-	-	-	-

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 con una gran base de datos de información de los daños, obtenidos mediante encuestas de campo después de un terremoto (Benedetti y Petrini, 1984; GNDT, 1993). 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) 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.

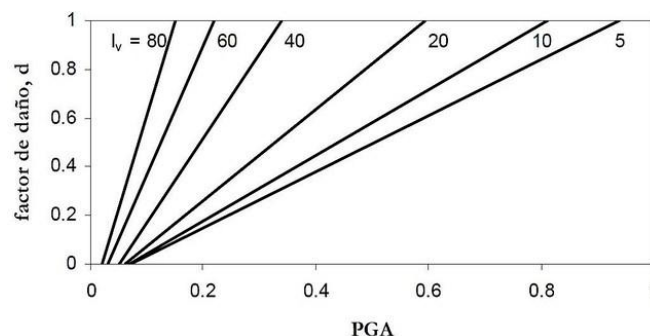


Figura 5. Funciones de vulnerabilidad para diferentes valores del índice de daño. (Calviet *et al.* 2006).

Por tanto, existe 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, Barbat *et al.* (1998). 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 basarse en una definición de vulnerabilidad general para toda la tipología.

El enfoque del índice de vulnerabilidad de Milutinovic y Trendafiloski (2003), fue adaptado e incorporado como el método del nivel I de las dos metodologías aplicadas dentro del proyecto Europeo RISK-UE reseñado por Mouroux *et al.* (2004), donde se evaluó la vulnerabilidad sísmica y se determinaron escenarios de riesgo sísmicos para 7 ciudades de Europa, caracterizadas por diferentes niveles de sismicidad, estas fueron: Barcelona (España), Bucarest (Rumania), Catania (Italia), Sofía (Bulgaria), Bitola (Yugoslavia), Tesalónica (Grecia) y Niza (Francia), véase por ejemplo Lantada *et al.* (2009).

Por otra parte, el enfoque de índice de vulnerabilidad es fácil de implementar dentro de una evaluación basada en SIG multi-riesgo, generalmente se utilizan para elaborar los escenarios sísmicos en las zonas urbanas y consisten en la simulación de un solo terremoto, por lo general la repetición del evento sísmico histórico en el área, y estimar una distribución realista de las consecuencias debido a este evento

sísmico. ENSURE (2009) destaca que el principal objetivo de estos procedimientos consiste en determinar si un edificio en particular requiere de una evaluación más detallada para una decisión sobre su nivel de riesgo sísmico, utilizando estos métodos o de análisis numéricos (métodos mecánicos).

El método de las curvas continuas de vulnerabilidad (fragilidad);

De naturaleza empírica, se encuentra basado directamente en los daños observados en edificios sometidos a terremotos históricos; 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), 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, (Figura 6).

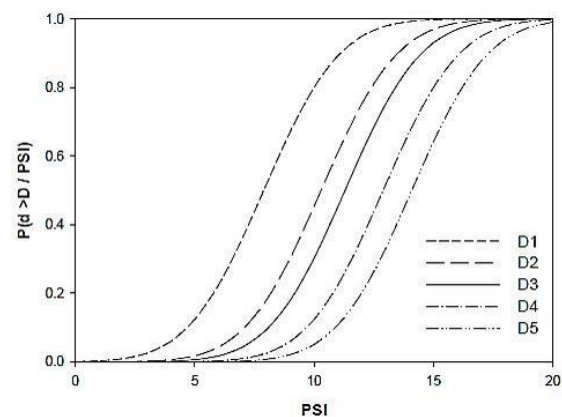


Figura 6. Curvas de vulnerabilidad de Spence *et al.* (1992) para pórticos de concreto armado utilizando el PSI y MSK.

Otras alternativas de curvas de vulnerabilidad empíricas basadas 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) como en Yamaguchi y Yamazaki (2000).

Método 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 (1990), plantea tres niveles o procedimientos de selección (I, II y III) en orden creciente de complejidad y de fiabilidad, para estimar el comportamiento sísmico de un edificio. El comportamiento sísmico de la 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 el comportamiento básico estructural, S_D es un subíndice relativo a la concepción estructural de la construcción, y T es un subíndice 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 y 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.* (2005) para evaluar la vulnerabilidad de edificios en Turquía, es una adaptación del método

(JSIM) con una misma concepción de energía equivalente y en base a levantamientos de edificios dañados por terremotos, plantea un índice de evaluación de la vulnerabilidad (I_s). Por otro lado, Hassan y Sozen (1997) 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 (2004) establece un índice de capacidad, a partir de considerar la configuración estructural y parámetros secundarios. Por otro lado, la propuesta de Bal *et al.* (2006), como una técnica de puntuación rápida para identificar las estructuras vulnerables a colapso, llamado P25-Método de puntuación, evalúa parámetros estructurales importantes que afectan la respuesta sísmica de edificios, y establece factores de ponderación. Bajo una misma concepción de evaluación rápida en Thermou y Pantazopoulou (2011), 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.

Con un enfoque de diagnóstico rápido para definir los resultados de vulnerabilidad de los edificios en EEUU es el procedimiento del ATC-21 (ATC, 1988), posteriormente con un sistema de puntuación más actualizado publican FEMA 154 (ATC, 2002); 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 basado en las características de construcción observadas.

- Los métodos analíticos/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 (Figura 2.7), y calibran directamente las características de los edificios existentes y la amenaza, (Calvi *et al.* 2006). De forma general, se basan principalmente en el análisis no lineal, ya que permite la degradación de la rigidez de los edificios existentes que se deben tomar en cuenta (Daniell, 2009), y se usan preferiblemente a escala local, debido al considerable esfuerzo computacional involucrado en el caso de grandes áreas de estudio. No obstante, pueden ser utilizados en estudios paramétricos para la planificación urbana, soluciones de reacondicionamiento sísmico y otras políticas o iniciativas similares.

Cualquiera 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, donde los métodos empíricos y analíticos se combinan con las observaciones (por ejemplo, Kappos *et al.* 2010) y los procedimientos específicos de calibración pueden ser utilizados para los modelos estructurales, evitando al mismo tiempo el esfuerzo computacional excesivo. Los modelos híbridos pueden ser especialmente ventajosos cuando hacen falta datos de daño en ciertos niveles de intensidad sísmica para la

zona geográfica en consideración, y permiten también la calibración de los modelos analíticos que se emplean en las simulaciones numéricas.

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 Dumova-Jovanoska (2004), resume las componentes básicas que se necesitan para obtener analíticamente las curvas de fragilidad o las matrices de probabilidad del daño.

Singhal y Kiremidjian (1998), 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 a la estructura un método de análisis dinámico no lineal. El nivel de movimiento del terreno para las curvas de fragilidad se caracteriza por la aceleración espectral y para MPD está dada por la intensidad de Mercalli modificada. Determinaron las probabilidades asociadas a los diferentes estados de daño de niveles mediante la técnica simulación de Monte Carlo y analizaron tres diferentes tipos de estructuras de concreto armado considerado el Índice de daño de Park y Ang (1985) para identificar los diferentes grados de daño. Luego desarrollaron curvas analíticas de fragilidad para estructuras de concreto armado utilizando procedimientos de simulación de Monte Carlo y actualizaron estas curvas de fragilidad utilizando la respuesta de edificios ante cargas sísmicas observadas en el terremoto de Northridge en 1994, representando un enfoque híbrido.

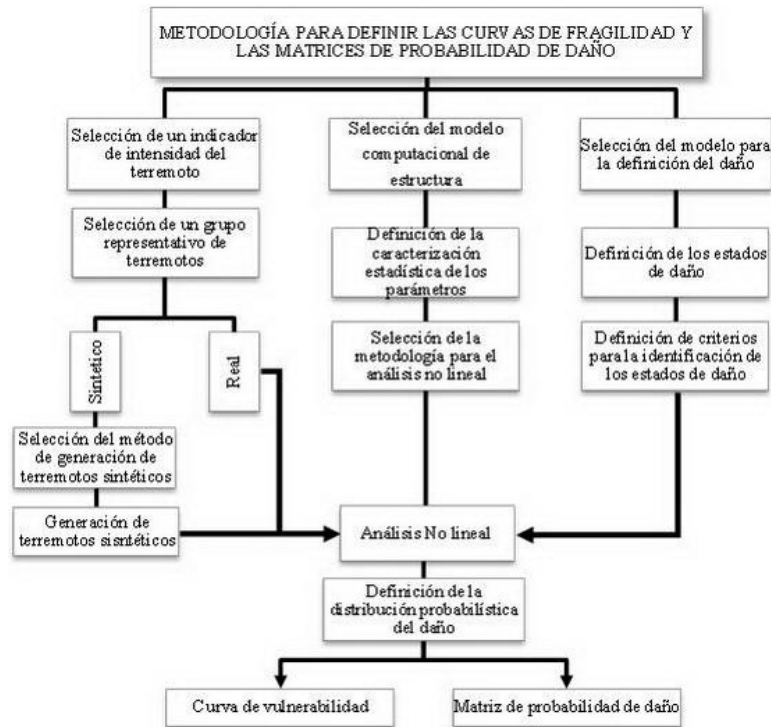


Figura 7. Componentes del cálculo de las curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño con métodos analíticos, (Dumova-Jovanoska 2004).

De otra forma, Masi (2003) empleó un procedimiento para caracterizar la vulnerabilidad sísmica de diferentes tipos de pórticos de concreto armado, que representaron edificios construidos en Italia, basándose en la aplicación de las normas italianas, manuales y prácticas de acuerdo a 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 (2004) generó curvas de vulnerabilidad y matrices de probabilidad de daño de edificios de concreto armado construidos en la región de Skopje. Las relaciones entre daño sísmico e 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 (1985). Para la probabilidad de ocurrencia del daño se adoptó una distribución normal.

En el enfoque de Rossetto y Elnashai (2005) 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 correlacionó con un estado de daño a través de una escala calibrada con datos experimentales. Este procedimiento se repitió 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 basadas en desplazamientos.

Ellingwood *et al.* (2007) consideró el desarrollo de las 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. Asume que la curva de fragilidad sigue una distribución log-normal y utiliza para su estimación el enfoque FORM que representa tanto las fuentes aleatorias y de incertidumbre epistémica de la capacidad estructural, por tanto, las fragilidades sísmicas se desarrollan para los pórticos usando simples modelos estocásticos de la demanda sísmica y la capacidad estructural. En el estudio de Vielma *et al.* (2007), 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, obteniendo 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 Kappose *et al.* (1998, 2010), 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 (fragilidad) en términos de aceleración máxima del suelo (PGA), así como de desplazamiento espectral, para edificios de concreto armado.

Michel *et al.* (2012), proponen un modelo de evaluación de vulnerabilidad para daños leves basado 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 completo 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.

Método basado en el Espectro de Capacidad;

Es una técnica de análisis sísmico basado en comportamiento desarrollado inicialmente por Freeman *et al.* (1975); luego fue adoptado y modificado como un procedimiento de análisis no lineal estático por el ATC-40 y FEMA 440 (ATC, 1996; ATC, 2005) 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 se ve 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 aceleración vs desplazamiento) como se muestra en la Figura 8.

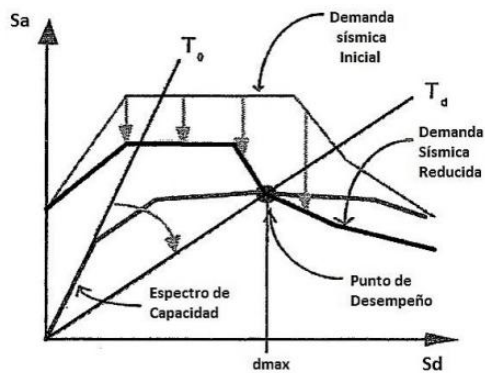


Figura 8. MEC para determinar el punto de capacidad por demanda

El espectro de capacidad es obtenido de un análisis estático no lineal con empuje incremental (*pushover*). Basado en 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 (HazardUS), fue desarrollada como un proyecto para estimar las pérdidas potenciales debidas a terremotos (NIBS, 1999; FEMA, 2003). Esta metodología originalmente incluye seis diferentes módulos como se muestra en la Figura 9 sobre: (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 debido a víctimas (6) pérdidas económicas indirectas, evaluación

de largo plazo. Por lo tanto, la evaluación de la vulnerabilidad del módulo (3) se realiza mediante el MEC del ATC-40; y las curvas de fragilidad representadas por funciones de distribución log-normal, y definidas para cuatro Estados Límite de daños.

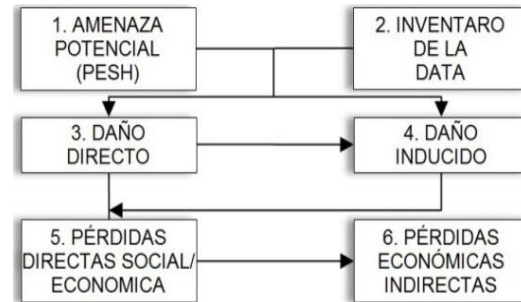


Figura 9. Módulos de HAZUS.

Giovinazzi (2005) presentó un procedimiento mecánico basado en desplazamiento para evaluar pórticos de concreto armado y mampostería, mediante una curva de capacidad que convirtió en un gráfico en formato S_a-S_d . Desarrolló espectros de capacidad para las tipologías de edificios, utilizando el método del espectro de capacidad (MEC) señalado anteriormente, sin embargo, los umbrales de desplazamiento los obtuvo en base a juicio de expertos. En el análisis de edificios prototipos se 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.* (1982), que no es necesariamente correcto debido a la simplificación que supone, esto se ha sido discutido en Calvi *et al.* (2006) con mayor detalle.

Método basado en Desplazamiento;

Existe un método de evaluación de la vulnerabilidad basado en desplazamientos, propuesto por Priestley en 1993 y desarrollado por Priestley (1997), Calvi (1999); 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 “DirectDisplacement-basedDesign (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 representación bilineal de fuerza desplazamiento de la estructura se caracteriza en términos de la rigidez efectiva o secante (K_e) en el desplazamiento máximo (Δ_d), (Priestley *et al.* 2007).

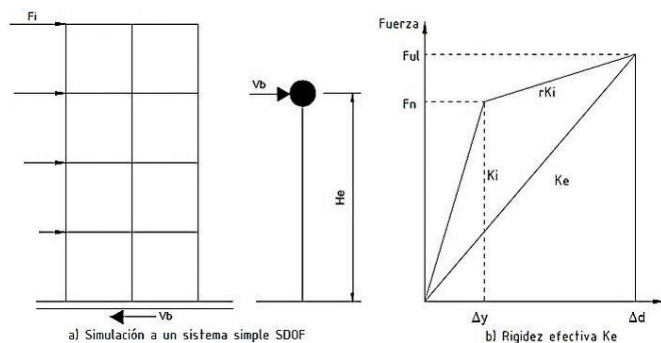


Figura 10. Fundamentos del DDBD, simulación de la estructura en SDOF y rigidez efectiva K_e . (Priestley *et al.* 2007).

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 en 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. (Ver Figura 10). Una versión refinada del enfoque DDBD propuesto por Calvi (1999), para

edificios de concreto armado en Europa, denominado DBELA se ha propuesto recientemente en (Crowley *et al.* 2008).

En otro contexto, considerando la importancia de algunas técnicas de evaluación expuesta con anterioridad en esta investigación, los autores han aplicado 7 técnicas de evaluación de daño en Ugel *et al.* (2012), en donde se expone la aplicación de las técnicas, se realizaron análisis comparativo y la conclusión de la implementación las mismas.

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 variadas y no se clasifican fácilmente en cualquiera de las categorías consideradas en el documento.

Los métodos de evaluación de la vulnerabilidad sobre la base de métodos 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 y los disponibles en la actualidad la simplificación de los modelos analíticos todavía requieren la validación de los 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 post-recolección de datos sísmicos.

En su revisión sobre metodologías de evaluación de vulnerabilidad Calvi *et al.* (2006) concluyen, que una metodología de evaluación de vulnerabilidad óptima o ideal debería tener las siguientes características principales: i) Deben incorporarse los

acontecimientos más recientes en el campo de la evaluación de los riesgos sísmicos, ii) Todas las fuentes de incertidumbre deben calcularse de forma explícita, iii) El modelo debe ser fácilmente adaptable a las prácticas de construcción de cualquier país y considerar la inclusión de nuevos tipos de edificaciones, iv) debe lograrse un equilibrio entre la intensidad computacional y la cantidad de datos detallados que se requiere y el consiguiente grado de confianza en los resultados. Sin embargo, es improbable que se pueda producir una metodología única capaz de cumplir con todos estos requisitos.

No obstante, la mitigación ante los efectos adversos generados por terremotos, la reducción de la vulnerabilidad de las edificaciones es una prioridad y por lo tanto, el desarrollo de modelos más fiables de evaluación de vulnerabilidad donde se combinan los métodos de analíticos y estadísticos debería conducir a mejores resultados y la validación bidireccional a través del ajuste de los criterios.

REFERENCIAS

- ATC. (1985). Earthquake Damage Evaluation Data for California, ATC-13, Applied Technology Council, California, U.S.A.
- ATC. (1988). Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook, ATC-21, Applied Technology Council, California, U.S.A.
- ATC. (1996). Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, ATC-40, Seismic Safety Commission, SSC Rep. 96-01, 1-2, California, U.S.A.
- ATC. (2002). Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook, Federal Emergency Management Agency, FEMA 154, 2da Edición, Washington, D.C.
- ATC. (2005). Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, FEMA 440, California, U.S.A.
- Bal, I., Tezcan, S., Gulay, F. (2006). Advanced applications of the P25 scoring method for the rapid assessment of R/C buildings, 1ra ECEES, 3-8, Genova, Switzerland, Paper: 67.
- Barbat, A., Carreño M., Pujades, L., Lantada, N., Cardona, O., Murulanda, 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
- Barbat, A., Mena, U., 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
- Benedetti, D., Petrini, V. (1984). Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura i proposte di un metodo di valutazione. L'Industriale delle Costruzioni, 149, 66-74.
- Bonett, R. (2003). Vulnerabilidad y riesgo sísmicos de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada, Barcelona – España: Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Braga, F., M. Dolce, 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.
- Calvi, G. (1999). A displacement-based approach for vulnerability evaluation of classes of buildings, Journal of Earthquake Engineering, 3(3), 411 - 438

- Calvi, G., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J., Restrepo, L., 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
- Cardona, O., Barbat, A. (2000). El riesgo sísmico y su prevención. Cuadernos técnicos, ed. C.S. S.R.L. 5, 190 p. Madrid.
- 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.
- CEPAL. (2005). El impacto de los desastres naturales en el desarrollo: Documento metodológico básico para estudios Nacionales de caso, Informe L-64, México.
- Corsanego, A, Petrini, V. (1990) Seismic vulnerability of buildings. In: Proceedings of the SEISMED 3. Trieste, Italia.
- Crowley, H., Borzi, B., Pinho, R., Colombi, M., 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.
- 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.
- Daniell, James. (2011). Damaging Earthquakes Database 2010 – The Year in Review, CATDAT, integrated historical global catastrophe database, CEDIM Earthquake Loss Estimation Series Research Report 2011-01
- Di Pasquale, G., Orsini, G. Romeo, R.W. (2005). New Developments in Seismic Risk Assessment in Italy, Bull Earthquake Engineering, 3(1), 101–128.
- Dolce, M., Kappos, A., Zuccaro, G., 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
- 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.
- Eleftheriadou, A., Karabinis, A. (2011). Development of damage probability matrices based on Greek earthquake damage data, Earthquake Engineering And Engineering Vibration, 10(1), 129-141.
- Ellingwood, B., Celik, O., Kinali, K. (2007). Fragility assessment of building structural systems in mid-America. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 36, 1935–1952.
- Ensure Project. (2009). WP 1: State-of-the art on vulnerability types, Del. 1.1.1: Methodologies to assess vulnerability of structural systems, Contract No. 212045, 1–139
- Fajfar, P. (2000). Nonlinear analysis method for performance based seismic design. Earthquake Spectra, EERI, United States of America, 16(3), 573-591.
- FEMA. (1996). NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 273), Federal Emergency Management Agency, Washington DC, U.S.A.

- FEMA. (2000). Prestandard and commentary for the Seismic rehabilitation of buildings (FEMA 356), Federal Emergency Management Agency, Washington DC, U.S.A.
- FEMA. (2003). HAZUS-MH Technical Manual, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C, U.S.A.
- Freeman, S., Nicoletti, J., 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.
- 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.
- Giovinazzi, S., Lagomarsino, S. (2004). A Macroseismic Method for the Vulnerability Assessment of Buildings, Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, Paper No. 896.
- GNDT. (1993). Rischio Sismico di edifici Pubblici-Parte I Aspetti Metodologici. CNR - Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti. Roma, Italia.
- Grünthal, G. (1998). European Macroseismic Scale 1998 - EMS-98, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. 15, Luxemburgo.
- Hassan, A., Sozen, M.A. (1997). Seismic Vulnerability Assessment of Low-Rise Buildings in Regions with Infrequent Earthquakes, ACI Structural Journal, 94(1), 31-39.
- JBDPA. (1977). Standard for Seismic Capacity Assessment of Existing Reinforced Concrete Buildings, Japanese Building Disaster Prevention Association, Ministry of Construction, Tokyo, Japan.
- Kappos, A., Panagopoulos, G. (2010). Fragility curves for reinforced concrete buildings in Greece, Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, 6(1-2), 39-53
- Kappos, A.J., Stylianidis, K.C. and Pitilakis, K. (1998). Development of Seismic Risk Scenarios Based on a Hybrid Method of Vulnerability Assessment, Natural Hazards. 17(2), 177-192.
- Lagomarsino, S., Giovinazzi, S. (2006). Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings, Bull Earthquake Engineering, 4, 415–443
- Lantada, N., Pujades, L., Barbat, A. (2009). Vulnerability index and capacity spectrum based methods for urban seismic risk evaluation. A comparison, NatHazards. 51, 501–524.
- Lindell. M., Prater. C., Perry, R. (2007). Introduction to Emergency Management, 1ra Edition.
- Masi, A. (2003). Seismic Vulnerability Assessment of Gravity Load Designed R/C Frames, Bull Earthquake Engineering, 1(3), 371-395.
- Medvedev, S., Sponheuer, W., Karník, V. (1965). Seismic intensity scale version MSK 1964, UNESCO, informe WS/0565.43 AVS, Paris, 1-7

- 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.
- Milutinovic, Z. & 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
- Mouroux, P., Bertrand E., Bour M., Le Brun B., Depinois S., 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
- NIBS. (1999). HAZUS 99 Technical Manuals, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C, U.S.A.
- Ozdemir, P., Boduroglu, M., 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
- Park, Y., Ang, A. (1985). Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete, *Journal of Structural Engineering*, 111(4), 722-739.
- Priestley, M. (1997). Displacement-based seismic assessment of reinforced concrete buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 1(1), 157-192.
- Priestley, M., Calvi G., Kowalski M. (2007). Displacement-based seismic design of structures. IUSS Press. Pavia. Italia.
- Rossetto, T., 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.
- Safina, Salvador. (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.
- Sandi, H., Pomonis, A., Francis, S., Georgescu, E., Mohindra, R., Borcia, I. (2008). Development of a nationwide seismic vulnerability estimation system, *Constructii*, 1, 28-47.
- Singhal, A., Kiremidjian, A. (1998). Bayesian updating of fragilities with application to RC frames. *Journal of Structural Engineering*, 124(8), 922–929.
- Spence, R., Coburn, A., 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.
- Thermou, G., Pantazopoulou, S. (2011). Assessment Indices For The Seismic Vulnerability Of Existing R.C. Buildings, *Earthquake Engineering And Structural Dynamics*. 40, 293–313.
- Ugel, R., Herrera, I., Vielma, J., Pujades, L. (2012). Análisis de escenarios de riesgo sísmico para toma de decisiones. Aplicación a edificio aparcado de concreto armado en el municipio valencia, *Ingeniería y Sociedad UC*, 7(1), 20-34.

Vicente. R., Parodi. S., Lagomarsino. S., Varum. H., Mendes. J. (2011). Seismic vulnerability and risk assessment: case study of the historic city centre of Coimbra, Portugal, Bull Earthquake Engineering, 9, 1067-1096

Fecha de recepción: 09 de julio de 2012

Fecha de aceptación: 12 de noviembre de 2012

Vielma, J., Barbat, A., 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.

Whitman, R., Reed, J., Hong, S. (1973). Earthquake Damage Probability Matrices, Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering, Roma, Italia, 2, 2531-2540

Wood, H., Neumann, F., (1931). Modified Mercalli intensity scale of 1931, Bulletin of the Seismological Society of America, 21(4), 277-283.

Yakut, A. (2004). Preliminary Seismic Performance Assessment Procedure for Existing RC Buildings, Engineering Structures, 26(10), 1447-1461.

Yamaguchi, N., 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

Yépez, F., Barbat, Alex., 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.