

# EL RIESGO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS

## **O. Cardona**

*Facultad de Ingeniería  
Universidad de los Andes  
Carrera 1ª, No. 18ª-70, Bogotá, Colombia  
e-mail: ocardona@uniandes.edu.co*

## **A. Barbat**

*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de  
Caminos Canales y Puertos de Barcelona  
Universidad Politécnica de Cataluña  
Campus Norte UPC, 08034 Barcelona  
e-mail: alex.barbat@upc.es*

## **1 INTRODUCCIÓN**

En los últimos años, desde la perspectiva de los desastres, se ha intentado definir el riesgo para poder realizar su gestión, como las posibles consecuencias económicas, sociales y ambientales que pueden ocurrir en un lugar en un tiempo determinado. Esto quiere decir que para estimar el riesgo es necesario tener en cuenta, desde un punto de vista multidisciplinar, no solamente el daño físico esperado, las víctimas o pérdidas económicas equivalentes, sino también factores sociales, organizacionales e institucionales, relacionados con el desarrollo de las comunidades. A escala urbana, por ejemplo, la vulnerabilidad como factor interno de riesgo debe relacionarse no solamente con la exposición del contexto material o su susceptibilidad física de ser afectado, sino también con las fragilidades sociales y la falta de resiliencia de la comunidad propensa. La falta de organización institucional y comunitaria, las debilidades en los preparativos para la atención de emergencias, la inestabilidad política y la falta de salud económica de un área geográfica contribuyen a tener un mayor riesgo. Por lo tanto, las consecuencias potenciales no sólo están relacionadas con el impacto del suceso, sino también con la capacidad para soportar el impacto y las implicaciones del impacto en el área geográfica afectada.

## 2 CONCEPTO DE VULNERABILIDAD

En el proceso de desarrollo, el hombre tuvo que conceptualizar de manera apropiada elementos vinculados a su hábitat y medio ambiente y las posibilidades de interacción entre ellos. A pesar de que en principio se haya tenido una percepción confusa acerca del término *vulnerabilidad*, esta acepción ha contribuido a dar claridad al concepto de desastre, que durante mucho tiempo se asimiló como un hecho asociado a una sola causa y ante el cual no había mucho que hacer.

El marco conceptual de la *vulnerabilidad* surgió de la experiencia humana en situaciones en que la propia vida diaria normal era difícil de distinguir de un desastre. La gran mayoría de las veces existían condiciones extremas que hacían realmente frágil el desempeño de ciertos grupos sociales, las cuales dependían del nivel de desarrollo alcanzado, así como también de la planificación de ese desarrollo. Para ese entonces ya, el proceso de desarrollo se empezó a considerar como la armonía entre el hombre y el medio ambiente. Se empezó a identificar entonces en los grupos sociales la *vulnerabilidad*, entendida como la reducción de la capacidad a “acomodarse” a determinadas circunstancias. Dicha vulnerabilidad ha sido definida de diferentes maneras, entre las que se citan las siguientes:

- “Poder ser herido o recibir lesión, física o moralmente. Estar propenso a o ser susceptible de daño o perjuicio. Grado de pérdida de los elementos que corren riesgo” (*Diccionario de la Real Academia Española*).
- “Características de una persona o grupo desde el punto de vista de su capacidad para anticipar, sobrevivir, resistir y recuperarse del impacto de una amenaza natural”.
- “Grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos en riesgo resultado de la probable ocurrencia de un suceso desastroso, expresada en una escala desde 0 o sin daño a 1 o pérdida total”.
- “Condición en la cual los asentamientos humanos o los edificios se encuentran en peligro en virtud de su proximidad a una amenaza, la calidad de la construcción o ambos factores”.
- “Incapacidad de una comunidad para "absorber" mediante el auto ajuste, los efectos de un determinado cambio en su medio ambiente. Inflexibilidad ante el cambio. Incapacidad de adaptarse al cambio, que para la comunidad constituye, por las razones expuestas, un riesgo”.

La UNDRO y la UNESCO promovieron una unificación de definiciones que se sintetiza a continuación (UNDRO 1979):

- Amenaza, peligro o peligrosidad (*Hazard* - **H**). Es la probabilidad de ocurrencia de un suceso potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio dado.
- Vulnerabilidad (*Vulnerability* - **V**). Es el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo resultado de la probable ocurrencia de un suceso desastroso, expresada en una escala desde 0 o sin daño a 1 o pérdida total.
- Riesgo específico (*Specific risk* - **R<sub>s</sub>**). Es el grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un suceso particular y como una función de la amenaza y la vulnerabilidad.
- Elementos en riesgo (*Elements at risk* - **E**). Son la población, los edificios y obras civiles, las actividades económicas, los servicios públicos, las utilidades y la infraestructura expuesta en un área determinada.
- Riesgo total (*Total risk* - **R<sub>t</sub>**). Se define como el número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica debido a la ocurrencia de un desaste, es decir el producto del riesgo específico, **R<sub>s</sub>**, y los elementos en riesgo, **E**.

Con estas definiciones, la evaluación del riesgo puede llevarse a cabo mediante la siguiente fórmula general:

$$R_t = E \times R_s = E \times H \times V \quad (1)$$

Conservando este marco conceptual propuesto por el grupo de expertos reunidos en 1979, Cardona propuso en 1985 eliminar la variable exposición, **E**, por considerarla implícita en la vulnerabilidad, **V**, sin que esto modificara sensiblemente la concepción original. En otras palabras: no se “es vulnerable” si no se “está expuesto”. Más tarde, Cardona (1986) planteó la siguiente manera de conceptualizar la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo: Una vez conocida la amenaza o peligro **A<sub>i</sub>**, entendida como la probabilidad de que se presente un suceso con una intensidad mayor o igual a *i* durante un período de exposición **t**, y conocida la vulnerabilidad **V<sub>e</sub>**, entendida como la predisposición intrínseca de un elemento expuesto *e* a ser afectado o de ser susceptible a sufrir una pérdida ante la ocurrencia de un suceso con una intensidad **i**, el riesgo **R<sub>ie</sub>**

se entiende como la probabilidad de que se presente una pérdida sobre el elemento  $e$ , como consecuencia de la ocurrencia de un suceso con una intensidad mayor o igual a  $i$

$$Riel_t = (Ai, Ve)_t \quad (2)$$

es decir, la probabilidad de exceder unas consecuencias sociales, económicas o ambientales durante un período de tiempo  $t$  dado. De esta forma, hoy es ampliamente aceptado que el concepto de amenaza, en general, se refiere a un peligro latente o factor de riesgo externo de un sistema o de un sujeto expuesto que se puede expresar matemáticamente como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un suceso con una cierta intensidad, en un sitio específico y en un período de tiempo determinado y la vulnerabilidad puede entenderse como un factor de riesgo interno que matemáticamente está expresado como la factibilidad de que el sujeto o sistema expuesto sea afectado por el fenómeno que caracteriza la amenaza. De acuerdo con lo anterior la *vulnerabilidad* se puede definir como un *factor de riesgo interno de un sujeto o sistema expuesto a una amenaza, correspondiente a su predisposición intrínseca a ser afectado o de ser susceptible a sufrir un daño*. La vulnerabilidad es, en otras palabras, la predisposición o susceptibilidad física, económica, política o social que tiene una comunidad de ser afectada o sufrir daños en caso de que se manifieste un fenómeno desestabilizador de origen natural. La diferencia de vulnerabilidad del contexto social y material expuesto ante un fenómeno peligroso determina el carácter selectivo de la severidad de los efectos de dicho fenómeno.

El término *vulnerabilidad* ha sido utilizado por varios autores para referirse a *riesgo* e incluso ha sido usado para referirse a condiciones de desventaja, particularmente en disciplinas de las ciencias sociales. Sin embargo, en el campo de los desastres es necesario preguntarse: ¿vulnerable ante qué?. Es decir, debe existir la amenaza para efectos de que se presente una situación condicional, mutuamente concomitante, que representa el estar en riesgo. Si no hay amenaza no es factible ser vulnerable, en términos del potencial daño o pérdida que significa la ocurrencia de un desastre. De la misma manera, no hay una situación de amenaza para un elemento o sistema si dicho elemento no está *expuesto* a la misma y si no es vulnerable a la acción del fenómeno que representa el peligro o amenaza considerada.

Al igual que durante muchos años se utilizó el término *riesgo* para referirse a lo que hoy se le denomina como amenaza, actualmente se hace referencia en muchas ocasiones a la palabra *vulnerabilidad* con el significado de *riesgo*. Es importante recordar que son conceptos diferentes y su definición obedece a un enfoque metodológico que facilita el entendimiento del *riesgo* y su posibilidad de reducirlo o mitigarlo. En muchas ocasiones no es posible actuar sobre la amenaza o es muy difícil hacerlo; bajo este enfoque, para reducir el *riesgo* no habría otra alternativa que disminuir la *vulnerabilidad* de los elementos expuestos.

### 3 DIMENSIONES Y TIPOS DE VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad puede tener varias dimensiones o tipologías, dependiendo del aspecto que se esté teniendo en cuenta para su análisis. Wilches-Chaux (1989) propuso el concepto de vulnerabilidad global para integrar los diferentes aspectos o dimensiones que caracterizan la vulnerabilidad desde varias perspectivas. Dichas dimensiones de la vulnerabilidad se describen brevemente a continuación.

**Dimensión física.** Expresa las características de ubicación en áreas propensas y las deficiencias de resistencia de los elementos expuestos, de los que depende su capacidad de absorber la acción del suceso que representa la amenaza. La resistencia al sismo de un edificio, la ubicación de una comunidad en el área de influencia de un deslizamiento o en el cauce de un río, son ejemplos de la dimensión física de la vulnerabilidad.

**Dimensión económica.** Los sectores económicamente más deprimidos son los más vulnerables. La pobreza aumenta la vulnerabilidad. Al nivel local e individual este aspecto se expresa en desempleo, insuficiencia de ingresos, dificultad o imposibilidad de acceso a los servicios. En la esfera nacional se traduce en una excesiva dependencia económica de factores externos incontrolables, la falta de diversificación de la base económica, las restricciones al comercio internacional y la imposición de políticas monetarias.

**Dimensión social.** Cuanto más integrada esté una comunidad, superando los inconvenientes que suelen presentarse, le resultará más fácil absorber las consecuencias de un desastre y podrá reaccionar con mayor rapidez que una comunidad que no lo esté. Las sociedades

pueden ser más o menos vulnerables en el sentido que pueden reaccionar como grupo organizado, mediante procesos de autoorganización, ó con intereses particulares primando sobre los de grupo, con relaciones más estrechas entre sus integrantes, ó relaciones meramente circunstanciales.

**Dimensión educativa.** Se expresa en una educación deficiente o que no tiene una buena cobertura en una comunidad propensa. La ausencia de conocimiento sobre las causas, los efectos y las razones por las cuales se presentan desastres, el desconocimiento de la historia y la falta de preparación y desconocimiento del comportamiento individual y colectivo en caso de desastre son aspectos que hacen que una comunidad sea más vulnerable. Igualmente, la falta de socialización de la información aumenta la vulnerabilidad.

**Dimensión política.** Se expresa en el nivel de autonomía que tiene una comunidad con respecto a sus recursos y para la toma de decisiones que la afectan. La comunidad se hace más vulnerable bajo esquemas centralistas en la toma de decisiones y en la organización gubernamental. La debilidad en los niveles de autonomía para decidir regional o localmente impide una mayor adecuación de las acciones a los problemas sentidos en estos niveles territoriales. En la medida que la comunidad participa más en las decisiones que le atañen es menos vulnerable.

**Dimensión institucional.** Esta relacionada con las dificultades que tienen las instituciones para hacer la gestión del riesgo. Situación que se refleja en la falta de preparación para responder ante un suceso, o cuando aún sabiendo que existe el riesgo no llevan a cabo acciones eficientes y efectivas para reducirlo o mitigarlo. Se expresa en la falta de flexibilidad de las instituciones, en el exceso de burocracia, en que prevalecen las decisiones políticas y en el protagonismo.

**Dimensión ambiental.** Hay un aumento de la vulnerabilidad cuando el modelo de desarrollo no esta basado en la convivencia sino en la explotación inadecuada y la destrucción de los recursos naturales. Esta circunstancia necesariamente conduce al deterioro de los ecosistemas y a aumentar la vulnerabilidad debido a la incapacidad de auto ajustarse para compensar los efectos directos o indirectos de la acción humana o de sucesos de la misma naturaleza.

**Dimensión cultural.** Esta dimensión de la vulnerabilidad está referida a la forma en que los individuos se ven a sí mismos en la sociedad y como colectividad, lo que influye en ocasiones de manera negativa debido a

estereotipos perniciosos que no se cuestionan y que se consolidan. Al respecto juegan un papel crucial los medios de comunicación, puesto que contribuyen a la utilización sesgada de imágenes o a la transmisión de información ligera o imprecisa sobre el medio ambiente, la misma sociedad y los desastres.

**Dimensión ideológica.** Esta relacionada con las ideas o creencias que tienen las personas sobre el devenir y los hechos del mundo. Se expresa en actitudes pasivas, fatalistas y en promover mitos relacionados con creencias religiosas que limitan la capacidad de actuar de los individuos en ciertas circunstancias. La percepción dogmática de las cosas puede generar confusión acerca de un propósito, falta de reacción y muchas veces pérdida de la motivación, que debilitan una acción transformadora. El planteamiento de una vulnerabilidad global, resultado de estas y otras dimensiones de la vulnerabilidad, permite visualizar la vulnerabilidad desde múltiples facetas y desde diversas perspectivas del conocimiento. Este planteamiento facilita el entendimiento de la vulnerabilidad como una condición o circunstancia dinámica o cambiante. Además, permite dimensionarla como un proceso acumulativo de fragilidades, deficiencias o limitaciones que permanecen en el tiempo como factores que inciden en que exista o no una mayor o menor vulnerabilidad. Desde el punto de vista de la gestión del riesgo, las acciones que reduzcan estos factores y que estimulen las fortalezas y capacidades de una comunidad, entendida como los elementos expuestos, deben ser el objetivo de la planificación y la prevención-mitigación.

## 4 LA VULNERABILIDAD Y LAS CARENCIAS DE DESARROLLO

La vulnerabilidad de los asentamientos humanos está íntimamente ligada a los procesos sociales que allí se desarrollan y está relacionada con la fragilidad, la susceptibilidad o la falta de resiliencia de los elementos expuestos a amenazas de diferente índole. La degradación del entorno, el empobrecimiento y los desastres son sucesos que se materializan como resultado de la construcción social del riesgo, mediante la gestación en unos casos de la vulnerabilidad y en otros casos de amenazas o de ambas circunstancias simultáneamente. Desde el punto de vista social, la

vulnerabilidad refleja una carencia o déficit de desarrollo ya que el riesgo se genera y se construye socialmente. En los países en desarrollo se percibe un incremento en la vulnerabilidad ocasionado por factores como el rápido e incontrolable crecimiento urbano y el deterioro ambiental, que ocasionan la pérdida de la calidad de vida, la destrucción de los recursos naturales, del paisaje y la diversidad genética y cultural. En numerosos países del tercer mundo la degradación ambiental, la pobreza y un rápido crecimiento demográfico pueden transformar un fenómeno natural en un desastre de gran envergadura (Wijkman y Timberlake 1984). Esto conduce a pensar que es necesario cuestionar el modelo de desarrollo si dicho desarrollo exacerba la vulnerabilidad, como está ocurriendo en muchos lugares del mundo.

Hay algunos procesos globales a los cuales se debe prestar más atención, como el crecimiento de la población, la urbanización rápida, presiones financieras internacionales, degradación de la tierra, cambio ambiental global y guerra. Como ejemplo, la urbanización ha contribuido considerablemente a los severos daños en ciertos terremotos urbanos: el aumento de la población es una de las razones que explica el incremento de personas afectadas como resultado de sequías e inundaciones, así como la deforestación aumenta las inundaciones y el riesgo de deslizamientos (Blakie et al. 1992).

Aceptando que existe una alta relación entre las carencias de desarrollo y la vulnerabilidad, se pueden plantear los siguientes factores generales que originan la vulnerabilidad:

- a) La exposición, que se refiere a la susceptibilidad del asentamiento humano debido a su fragilidad física o proximidad a la zona de influencia de los fenómenos peligrosos.
- b) La fragilidad social, que se refiere al nivel de marginalidad y segregación social del asentamiento humano y sus condiciones de desventaja y debilidad relativa por factores socioeconómicos.
- c) La falta de resiliencia, que expresa las limitaciones de acceso y movilización de recursos del asentamiento humano, su incapacidad de respuesta y sus deficiencias para absorber el impacto.

Este tipo de planteamiento intenta integrar de manera *holística* la lectura de las ciencias físicas y las ciencias sociales, con el fin de tener una visión completa de los factores que originan o exacerban la vulnerabilidad, teniendo en cuenta los aspectos de resistencia física ante los fenómenos y los aspectos prevalecientes de autoprotección individual y colectiva.

## 5 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y DEL RIESGO

Si lo que se pretende es la evaluación del riesgo, indudablemente el estudio y la evaluación de la amenaza es un paso de fundamental importancia; sin embargo, para lograr dicho propósito es igualmente importante el estudio y el análisis de la vulnerabilidad. Por esta razón se ha promovido el estudio la vulnerabilidad física, la cual básicamente se relaciona con el grado de exposición y la fragilidad o capacidad de los elementos para soportar la acción de los fenómenos. Este último aspecto permite ampliar el trabajo a un ámbito multidisciplinar debido a la necesidad de involucrar a ingenieros, arquitectos, economistas y planificadores, quienes paulatinamente han encontrado de especial importancia la consideración de la amenaza y la vulnerabilidad como variables fundamentales para la planificación física y las normas de construcción de edificios e infraestructura.

La visión acerca de la vulnerabilidad y el riesgo de los geofísicos, hidrólogos, ingenieros, planificadores, etc., puede llegar a ser muy diferente de la visión de las personas, comunidades expuestas y autoridades gubernamentales encargadas de la gestión y de la toma decisiones para la reducción o mitigación del riesgo. Por esta razón hoy se acepta que es necesario profundizar, también, el conocimiento acerca de la percepción individual y colectiva del riesgo e investigar las características culturales, de desarrollo y de organización de las sociedades que favorecen o impiden la prevención y la mitigación. Son aspectos de fundamental importancia para poder encontrar medios eficientes y efectivos que logren reducir el impacto de los desastres en el mundo (Maskrey 1994).

El riesgo es un concepto curioso y complejo. Está siempre relacionado con el futuro, con posibilidades, con algo que aun no ha sucedido. Es algo imaginario, que nunca puede existir en el presente sino sólo en el futuro. Si hay certeza no hay riesgo, que está íntimamente ligado a la psicología personal o colectiva, aun cuando se intente a menudo darle un sentido de objetividad. En la noción de riesgo vienen simultáneamente tres aspectos separados: probabilidad, consecuencias y contexto, que contribuyen a la hora de intentar llevar a cabo su calificación (Elms 1992). En un análisis de riesgo, el contexto (capacidad de la gestión y

actores relacionados) determina los límites, las razones, el propósito y las interacciones a considerar. Cualquier análisis que se realice debe ser congruente con el contexto y tenerlo en cuenta en todos los aspectos que le sean relevantes, de lo contrario el análisis sería totalmente inútil e irrelevante. Esto podría explicar el porqué aunque se realicen muchos estudios de amenaza, vulnerabilidad e incluso de riesgo desde el ámbito de diferentes disciplinas, en muchos lugares del mundo no se logra aun una intervención y gestión efectiva y decidida por parte de las autoridades y las comunidades que mitigue o reduzca el riesgo al cual se encuentran sometidas (Cardona 1999a).

El riesgo está siempre asociado con decisión, con algo que debe hacerse, con la ejecución de una que se debe llevar a cabo. Los resultados de cada acción factible son inciertos. Unos pueden ser mejores que otros, en algunos casos serán buenos y en otros pueden ser desastrosos. Seleccionar una posible acción significa asumir un riesgo asociado a dicha acción. Dicho riesgo debe evaluarse para que se pueda tomar una decisión. Tener que considerar incertidumbres en el análisis de sistemas físicos llega a ser una de las circunstancias que permite decidir si un modelo dado es apropiado para el problema que se debe resolver. Esto significa conmutarse del concepto de verdad al concepto de control o de gestión, alejándose de la necesidad de *predecir* futuros escenarios, con o sin la estimación de incertidumbres, y moverse hacia la necesidad de *controlar* los futuros sucesos, aceptando las inevitables incertidumbres en el entendimiento de que algo podría o no ocurrir. Por lo tanto, aunque la ingeniería pueda hacer algunas predicciones acerca del riesgo, dichas predicciones serán inevitablemente parciales e incompletas y en consecuencia el énfasis debe estar en la gestión de la seguridad.

### 5.1 Análisis de la vulnerabilidad

Un análisis de vulnerabilidad, en rigor, es un estudio de la capacidad de un elemento o sistema de resistir o absorber el impacto de un suceso que caracteriza una amenaza, y por lo tanto se diferencia del análisis de riesgo, que se refiere a la estimación de uno o varios escenarios de pérdidas o consecuencias factibles de acuerdo con el grado de amenaza considerado y con el nivel de vulnerabilidad existente en los elementos expuestos. Por esta razón, las evaluaciones de vulnerabilidad física han sido las que más se han desarrollado desde el punto de vista metodológico. Las técnicas más conocidas son las estiman el daño que

podría presentarse en un edificio, un conjunto de edificios o una infraestructura si ocurre un sismo de una cierta severidad, de acuerdo con la capacidad sismorresistente de los mismos. El riesgo se refiere, en este caso, a las pérdidas o consecuencias que significaría si ocurre dicho daño.

Un análisis de vulnerabilidad es un proceso mediante el cual se determina el nivel de exposición y la predisposición al daño de un elemento o grupo de elementos ante una amenaza específica, contribuyendo al conocimiento del riesgo a través de interacciones de dichos elementos con el ambiente peligroso. Los elementos expuestos o en riesgo son el contexto social y material representado por las personas y por los recursos y servicios que pueden ser afectados por la ocurrencia de un suceso, es decir, las actividades humanas, los sistemas realizados por el hombre, tales como edificios, líneas vitales o infraestructura, centros de producción, utilidades, servicios y la gente que los utiliza. En general, la evaluación de la capacidad sismorresistente de edificios o de obras civiles existentes es un caso de análisis de vulnerabilidad física.

La vulnerabilidad, en términos generales, puede clasificarse desde el punto de vista de su evaluación como de carácter técnico y de carácter social. La primera es factible de cuantificar en términos físicos y funcionales como, por ejemplo, en daños físicos potenciales o en interrupciones en la operación de un servicio. La segunda, prácticamente sólo se puede valorar en forma cualitativa o relativa, debido a que está relacionada con aspectos económicos, educativos, culturales, etc., que usualmente se estiman por medio de índices o indicadores.

## **5.2 Estimación del riesgo**

El riesgo se obtiene a partir de relacionar la amenaza con la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Desde el punto de vista físico, el “riesgo específico” es la pérdida esperada en un período de tiempo, que puede ser expresada como una proporción del valor o coste de reemplazo de los elementos en riesgo. Usualmente, el riesgo específico se representa en términos de pérdida de vidas, afectados y pérdidas económicas. Ahora bien, debido a la dificultad que significa estimar el “riesgo total”, o sea la cuantificación acumulativa del riesgo específico de cada uno de los elementos expuestos y para cada una de las amenazas, se acepta la evaluación de un riesgo específico representativo

para la región, como por ejemplo, el riesgo por inundación para las cosechas, el riesgo sísmico de los edificios, el riesgo de las líneas vitales por deslizamientos, etc.

Una vez evaluado el riesgo y teniendo en cuenta que no es posible reducirlo en su totalidad, para efectos de planificación, protección y diseño de obras de infraestructura ha sido necesario definir un nivel de “riesgo aceptable”. El riesgo aceptable es un valor de probabilidad de consecuencias sociales, económicas o ambientales que, a juicio de las autoridades que regulan este tipo de decisiones, es considerado lo suficientemente bajo para permitir su uso en la planificación física, la formulación de requerimientos de calidad de los elementos expuestos o para fijar políticas socioeconómicas afines.

Al igual que la amenaza, el riesgo también puede plasmarse en mapas. Estos mapas pueden ser, dependiendo de la naturaleza de la amenaza, probabilistas o deterministas. En este último caso, los mapas de riesgo representan un “escenario”, o sea la distribución espacial de los efectos potenciales que puede causar un suceso de una intensidad definida sobre un área geográfica, de acuerdo con el grado de vulnerabilidad de los elementos que componen el medio expuesto. Estos mapas, no sólo son de fundamental importancia para la planificación de la intervención de la amenaza y/o la vulnerabilidad, sino también para la elaboración de los planes de contingencia que los organismos operativos deben realizar durante la etapa de preparativos para emergencias. Como ejemplo, en la figura 1 se muestra un escenario de riesgo específico para la ciudad de Bogotá, Colombia (Cardona y Barbat 2000). Es importante anotar que un plan operativo elaborado con base en un mapa de riesgo es mucho más eficiente que si se realiza sin conocer dicho escenario, dado que un mapa de riesgo permite definir procedimientos de respuesta más precisos para atender a la población en caso de desastre.

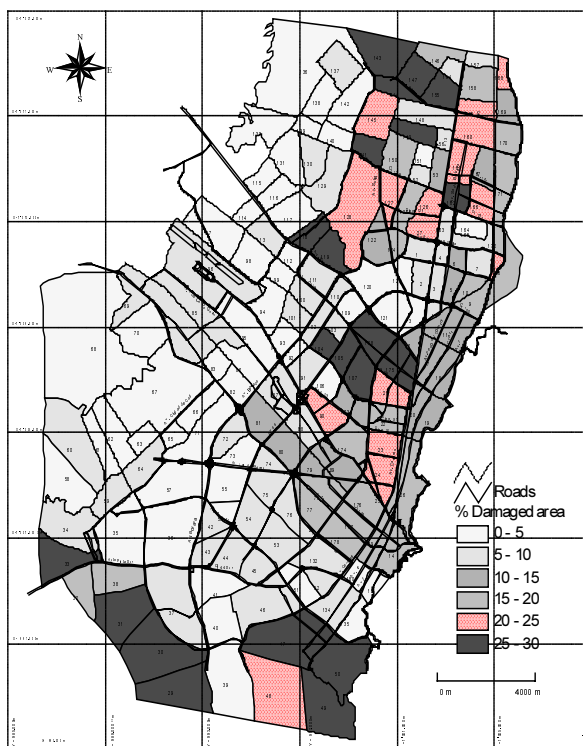
No obstante, existen serios interrogantes acerca de la efectividad de las metodologías para la cuantificación del riesgo tal como se ha venido haciendo hasta ahora. Salvo algunas excepciones y esfuerzos dispersos o puntuales, no se han dado pasos decididos para lograr una formulación y modelización holística del riesgo que además facilite la toma de decisiones y contribuya a la gestión efectiva por parte de las autoridades y las comunidades, que son los actores fundamentales para lograr una actitud preventiva frente a los desastres naturales.

### 5.3 Aceptabilidad del riesgo

Excepto valores cuantitativos proporcionados por de algunos cuerpos legislativos del oeste norteamericano, puede decirse que prácticamente no existen leyes que establezcan un “valor” de riesgo aceptable que, en términos generales, es aquel que la comunidad esta dispuesta asumir a cambio de determinada tasa o nivel de beneficios. En el diseño de las obras de ingeniería ha sido común utilizar el concepto de riesgo aceptable en forma implícita, con el fin de lograr un nivel de protección y seguridad que justifique una inversión teniendo en cuenta como referencia la vida útil de la obra. Para ello se utilizan factores de seguridad que en términos probabilistas cubren “razonablemente” la incertidumbre de la posible magnitud de las amenazas, la imprecisión de la modelización analítica y la aproximación de las hipótesis de análisis y diseño.

Según Starr (1969), en los países desarrollados la comunidad desea que los riesgos involuntarios, tales como los desastres, sean alrededor de 100 a 10 000 veces menores que los voluntarios. Es decir, que para una catástrofe el número de muertes podría estar entre 1 y 0.01 por millón de personas expuestas anualmente. De acuerdo con esta apreciación se sugirió que 0.1 podría ser el valor usado como aceptable para el caso de los terremotos y otros desastres igualmente severos. Algunos países desarrollados han utilizado este tipo de estudios para definir el nivel de seguridad que deben ofrecer ciertas infraestructuras, como las presas, ante las amenazas a las que están expuestas.

En muchas ocasiones, las amenazas son conocidas por la población expuesta y se reconoce el riesgo al que están sometidas tanto por las mismas comunidades como por sus autoridades. A pesar de que técnicamente e incluso institucionalmente existen maneras de definir con un adecuado criterio un nivel de riesgo “aceptable” o “inaceptable”, muchas comunidades no tienen otra alternativa que aceptar el peligro por la falta de posibilidades de acceso a los recursos y/o por su imposibilidad de participar en el proceso de toma de decisiones.



*Figura 1: Escenario de daños para un sismo fuerte en Bogotá (Cardona y Barbat 2000).*

#### 5.4 Protección e incertidumbre

En la evaluación de pérdidas futuras se recurre a técnicas probabilistas, con lo que los riesgos se expresan en pérdidas medias de dinero o de vidas por año. Sin embargo debido a que sucesos de gran intensidad son hechos muy raros, las pérdidas medias pueden no dar una imagen representativa de las grandes pérdidas que podrían estar asociadas a los mismos. Esta dificultad puede resolverse determinando para un límite de pérdida la probabilidad de que éste sea igualado o sobrepasado. Un ejemplo puede ser la probabilidad de que el coste de los daños y reparaciones en un sitio sobrepase una cierta cantidad de como consecuencia de por lo menos un suceso en los próximos cincuenta años. Límite que podría también expresarse en términos de víctimas humanas o de fallos en los edificios.

Una metodología ampliamente utilizada para la determinación indirecta del nivel de riesgo en los países desarrollados y reiterativamente planteada en muchos artículos de orden técnico, es el análisis de coste y beneficio, en el cual se relaciona la inversión en seguridad con el potencial daño de las infraestructuras y el peligro para la vida. En áreas altamente propensas, en donde ocurren con frecuencia sucesos moderados, cualquier aumento en los costes de mitigación se verá compensado por la reducción de los daños esperados. Sin embargo, en áreas menos propensas o que no involucran grandes inversiones económicas amenazadas, los requisitos de mitigación se pueden justificar sólo en términos de seguridad para la vida, pues los ahorros esperados en daños por sucesos que ocurren con muy poca frecuencia no son lo suficientemente cuantiosos para justificar un aumento en los costes de la mitigación. Esta circunstancia ocurre particularmente en los países pobres, donde el análisis de coste y beneficio en términos económicos no es una buena metodología para argumentar las bondades de la prevención-mitigación.

Comúnmente los riesgos que resultan de la frecuente ocurrencia de un número menor de fatalidades tienden a generar menos aversión al riesgo que hechos poco frecuentes pero con grandes impactos, aunque la suma de las fatalidades de ambas causas sea comparable. En otras palabras, la percepción del riesgo no es lineal o simplemente existen otros valores que son muy importantes para la sociedad, tales como los costes ecológicos y los costes económicos directos e indirectos relacionados con el suceso. Para el público en general no es desconocido que el número de muertes causadas por accidentes de tránsito supera ampliamente al causado por terremotos, erupciones volcánicas u otros fenómenos similares. En países desarrollados, donde el nivel de resiliencia de las comunidades es alta, es decir, donde existe una alta capacidad de recuperación y de respuesta a la materialización de las amenazas, los sucesos menores o moderados frecuentes no causan el mismo efecto que en los países en desarrollo, donde la resiliencia es muy baja. La continua ocurrencia de sucesos menores o moderados en estos países debilita paulatinamente las comunidades y agrava sus condiciones de desarrollo y seguridad.

La aplicación de medidas preventivas no garantiza una seguridad del 100% de que no existan consecuencias, razón por la cual el riesgo no

puede eliminarse totalmente. Su valor, por pequeño que sea, nunca será nulo, por lo tanto siempre existe un límite hasta el cual se considera que el riesgo es controlable y a partir del cual no se justifica aplicar medidas preventivas. A todo valor que supere dicho límite se le cataloga como un riesgo incontrolable. Por ejemplo, las obras de ingeniería que se realizan para impedir o controlar ciertos fenómenos, siempre han sido diseñadas para soportar como máximo un suceso cuya probabilidad de ocurrencia se considera lo suficientemente baja, así que la obra pueda ser efectiva en la gran mayoría de los casos, es decir para los sucesos más frecuentes. Lo que significa que pueden ocurrir sucesos poco probables que no podrían ser controlados y para los cuales resultaría injustificado realizar inversiones mayores.

## 6 VULNERABILIDAD FÍSICA Y RIESGO SÍSMICO

Un terremoto es una transformación brusca de energía: la energía de deformación acumulada en la litosfera se convierte súbitamente en energía cinética; ésta se manifiesta por medio de movimientos ondulatorios que se transmiten en el interior y en la superficie de la tierra. Esta energía, atenuada por la distancia, debe ser absorbida los edificios y, en caso de sismos severos, disipada. El conocimiento obtenido hasta ahora ha permitido desarrollar bases que facilitan efectuar un diseño de estructuras con razonable seguridad para la vida. Más aun, ha sido posible aplicar criterios económicos en el diseño sismorresistente optando por estructuras menos fuertes que lo necesario y, como consecuencia, de menor coste inicial; al ser estas sometidas a un movimiento sísmico severo, deben sufrir daños controlados, sin colapsar, y disipar así una parte importante de la energía absorbida. Paradoja que significa que al degradarse la estructura existe la posibilidad de que se salve del colapso y por lo tanto las vidas que se encuentran en su interior.

De hecho, el comportamiento sísmico adecuado de una estructura depende, además de su resistencia, de su habilidad de disipar energía vibratoria a partir del instante en que sus deformaciones exceden el límite elástico, es decir, de su *ductilidad*. La vibración de la estructura en el rango plástico durante sismos fuertes significa, por lo tanto, la ocurrencia de daños estructurales y no estructurales. Esto no debe confundirse con el comportamiento deficiente que una estructura puede

tener frente a un sismo incluso moderado, debido a un déficit de resistencia y/o a una ductilidad escasa, es decir, con su vulnerabilidad. Se acepta, en general, y así se recoge en algunas normativas, que los edificios sean diseñados para resistir sismos fuertes sin colapso, aun cuando se produzcan daños estructurales severos; sismos moderados sin daño estructural, pero con algún daño en elementos no estructurales; y sismos leves sin daño. En otras palabras, el nivel de riesgo aceptable o admisible, implícito legalmente en las normas, considera que la capacidad máxima de los elementos del sistema sismorresistente puede ser excedida y que éstos pueden experimentar un comportamiento inelástico durante sismos muy fuertes, al producirse un incremento de las deformaciones por encima de las de fluencia. Además se espera que se produzcan daños en los elementos no estructurales como tabiques, particiones, etc. en caso de sismos moderados y que, en general, son fácilmente reparables.

### **6.1 Daños estructurales por sismo**

En general, en los sitios donde se diseña de acuerdo con una buena normativa sismorresistente, donde la construcción es sometida a una supervisión estricta y donde el sismo de diseño es representativo de la amenaza sísmica real de la zona, el daño es marginal en comparación con el observado en sitios donde no se han dado estas circunstancias. No obstante, es importante resaltar que diseñar de acuerdo con una normativa no siempre salvaguarda contra el daño excesivo producido por terremotos severos. Los códigos por si solos no pueden garantizar la seguridad contra el daño excesivo, puesto que son reglamentos que experimentan actualizaciones continuas, de acuerdo con los avances tecnológicos y las enseñanzas que dejan las investigaciones y estudios de los efectos causados por terremotos, que deben utilizarse como pruebas de laboratorio a escala completa. Se ha demostrado que la ductilidad y redundancia estructural son los medios más eficaces para proporcionar seguridad contra el colapso, especialmente si los movimientos sísmicos reales son más severos que los anticipados en la fase de diseño. La capacidad de una estructura de soportar daños significativos permaneciendo estable se puede atribuir por lo general a su resistencia, ductilidad y redundancia. El daño severo o colapso de muchas estructuras durante terremotos importantes es, por lo general,

consecuencia directa del fallo de un sólo elemento o serie de elementos con ductilidad o resistencia insuficiente.

Es común que se produzcan daños estructurales en pilares durante los sismos muy fuertes, tales como grietas diagonales, causadas por cortante y/o torsión, o grietas verticales, desprendimiento del recubrimiento, aplastamiento del hormigón y pandeo de las barras longitudinales por exceso de esfuerzos de flexión y compresión. En vigas se producen grietas diagonales y rotura de estribos a causa de cortante y/o torsión y grietas verticales, rotura del refuerzo longitudinal y aplastamiento del hormigón por la flexión debida a cargas alternadas. Las conexiones entre elementos estructurales son, por lo general, los puntos más críticos. En las uniones viga-pilar (nudos), el cortante produce grietas diagonales y es habitual ver fallos por adherencia y anclaje del refuerzo longitudinal de las vigas a causa del poco desarrollo del mismo y/o a consecuencia de esfuerzos excesivos de flexión. En las losas se pueden producir grietas por punzonamiento alrededor de los pilares y grietas longitudinales a lo largo de la losa de piso debido a la excesiva demanda de flexión que puede imponer el sismo.

Observaciones realizadas en los últimos años en todo el mundo, indican que las construcciones rígidas se comportan, en general, mejor que las flexibles, particularmente en lo relativo a la protección de los componentes no estructurales, que sufren menor daño al limitarse el desplazamiento relativo entre pisos. Irregularidades en altura, traducidas en cambios bruscos de rigidez entre pisos adyacentes, hacen que la absorción y disipación de energía durante el sismo se concentren en los pisos flexibles, donde los elementos estructurales se ven sometidos a sollicitaciones excesivas. Las irregularidades en planta de masa, rigidez y resistencia pueden originar vibraciones torsionales que generan concentraciones de esfuerzos difíciles de evaluar, razón por la cual debe tenerse en cuenta una mayor exigencia en este tipo de aspectos a la hora de diseñar arquitectónicamente los edificios.

## **6.2 Daños no estructurales**

Generalmente, los daños no estructurales se deben a la unión inadecuada entre los muros de relleno o divisorios, las instalaciones y la estructura, o a la falta de rigidez de la misma, lo que se traduce en excesivas deformaciones que no pueden ser absorbidas por este tipo de componentes. Los daños no estructurales más comunes son el

agrietamiento de elementos divisorios de mampostería, el aplastamiento de las uniones entre estructuras y los elementos no estructurales, el desprendimiento de acabados y la rotura de vidrios y de instalaciones de diferente tipo. En los muros divisorios de mampostería, el cortante produce grietas diagonales usualmente en forma de X. La tendencia de vuelco de los mismos y la flexión pueden producir grietas verticales en sus esquinas y en su zona central. Efectos perjudiciales de este tipo se producen durante casi todos los terremotos, particularmente cuando se trata de sistemas estructurales flexibles que contienen tabiques o muros que llenan parcial o totalmente con mampostería rígida de ladrillo el entramado de vigas y pilares. Los pórticos con tabiques de relleno se vuelven más rígidos una vez que la estructura hace contacto con el tabique de relleno, incrementando la rigidez y cambiando las propiedades dinámicas de la estructura. Cuando los tabiques están distribuidos en forma asimétrica, pueden excitar además modos de vibración torsionales, dando lugar a un comportamiento muy desfavorable de la estructura. Estos tabiques se agrietan severamente si no han sido diseñados para soportar las fuerzas de interacción con el pórtico durante el terremoto e incluso pueden causar un efecto muy nocivo, pues dichas fuerzas pueden también causar graves daños en el propio pórtico. Un incremento inadvertido de resistencia y rigidez en los pisos superiores de un edificio por la mencionada interacción puede crear en los pisos inferiores el efecto de piso blando o flexible al cual ya se hizo referencia en el apartado anterior. Debido a la presencia de tabiques de relleno parcial entre los pilares, que cubren verticalmente el espacio desde el piso hasta el umbral de una ventana, se han producido en muchos casos daños severos e incluso colapsos por el conocido efecto de pilar corto. Dicho pilar tiende a fallar en forma frágil al ser sometido a esfuerzos cortantes elevados que se generan al ser impedida su deformación hasta la altura de los tabiques.

### **6.3 Vulnerabilidad de edificios existentes**

La vulnerabilidad de un edificio puede ser física y funcional. La vulnerabilidad física esta relacionada fundamentalmente con la capacidad que tiene la estructura para soportar los desplazamientos y los esfuerzos que uno o varios movimientos sísmicos pueden generar en la estructura durante su vida útil. La vulnerabilidad funcional, por otra parte, está

relacionada no solamente con la seguridad de la estructura, sino también con el comportamiento de los elementos no estructurales, tales como tabiques, instalaciones, equipos, etc., lo que es fundamental para que el edificio mantenga la capacidad de ofrecer sus servicios. Este aspecto es de máxima importancia en el caso de aquellos edificios cuya función es vital, como el caso de los hospitales.

Es importante mencionar que actualmente la vulnerabilidad funcional es uno de los temas en los que trabajan un amplio número de especialistas, pues desafortunadamente los últimos terremotos han demostrado graves colapsos funcionales, en particular de hospitales, aún cuando sus estructuras hayan tenido un buen comportamiento. Esta circunstancia ha motivado incluso la revisión de normas, particularmente del coeficiente de importancia, el cual aparentemente no es una garantía suficiente de la resistencia puesto que las normativas admiten daños en los elementos no estructurales en el caso de sismos fuertes.

Convencionalmente, cuando se lleva a cabo un análisis y diseño estructural, en realidad se está realizando la evaluación de la vulnerabilidad de un modelo propuesto con ciertas dimensiones y materiales teniendo como referencia los requisitos mínimos establecidos por una norma y considerando como aceptable el modelo cuando cumple o excede dichos requisitos. Sin embargo, este tipo de análisis de vulnerabilidad se realiza con el fin de proyectar dicho modelo, es decir, proponerlo como solución constructiva que debe llevarse a cabo cumpliendo con los menores márgenes de error, los cuales han sido tenidos en cuenta incluyendo factores de seguridad y de reducción de la resistencia.

Un análisis de vulnerabilidad de un edificio existente puede entenderse como la comprobación de que su estructura cumple los requisitos de las normativas vigentes. Sin embargo, la evaluación de dicha vulnerabilidad también puede entenderse como el cálculo de la capacidad que dicha estructura tiene para soportar las solicitaciones sísmicas reales. Esta evaluación difiere sustancialmente del proceso inverso de análisis que se realiza en la fase de diseño, pues en este caso las cargas deben ser las reales, al igual que la resistencia y la ductilidad de la estructura y de los elementos, sin considerar los tradicionales factores de seguridad.

#### 6.4 Vulnerabilidad sísmica de edificios indispensables

En los últimos veinte años, más de 120 instalaciones hospitalarias que atienden una población estimada entre 10 y 12 millones de personas de 9 países de las Américas, han sido afectados por terremotos. Cerca de una quinta parte de estas instalaciones han colapsado de manera catastrófica o tuvieron que ser demolidas como consecuencia de los daños sufridos por los desastres ocurridos. Esto ha representado pérdidas de vidas humanas irreparables y la desaparición de más de 12 000 camas hospitalarias. Este hecho revela la necesidad de revisar la estrategia de diseño y los criterios para la construcción de instalaciones hospitalarias en zonas propensas.

Un edificio puede quedar en pie después de un desastre pero quedar inhabilitado debido a daños no estructurales. El coste de las partes no estructurales en la mayoría de los edificios es considerablemente mayor que el de las estructurales. Esto se cumple especialmente en hospitales donde el 85 a 90% del valor de la instalación no está en los pilares, pisos y vigas, sino en los acabados arquitectónicos, sistemas mecánicos y eléctricos y en el equipo. Un movimiento sísmico de menor intensidad causará daños no estructurales mayores que los de los componentes estructurales. Por lo tanto, los aspectos más vitales de un hospital, aquellos que se relacionan directamente con su propósito y función, son los que más fácilmente se ven afectados o destruidos por los terremotos. La función que cumple un hospital debe mantenerse después de la ocurrencia de un sismo intenso, con el fin de que sea posible satisfacer las necesidades de atención médica que impone la emergencia. Si el hospital sufre graves daños no podrá cumplir su función cuando más se necesita y se convertirá así en objeto de la atención del desastre (Cardona 1999b).

La experiencia adquirida durante terremotos recientes muestra en muchos casos un excelente comportamiento de la estructura diseñada de acuerdo a los modernos criterios de sismorresistencia, acompañado por desgracia de una deficiente respuesta de los elementos no estructurales. Sin embargo, si se tiene en cuenta la seguridad de los ocupantes de un edificio y de los transeúntes expuestos al riesgo de colapso de tales elementos, así como el coste de reposición de los mismos y las pérdidas involucradas en la suspensión de funciones del edificio mismo, puede

comprenderse la importancia de considerar adecuadamente el diseño sísmico de los elementos no estructurales dentro del proyecto general del edificio.

### **6.5 Vulnerabilidad de centros urbanos**

Se han propuesto muchos métodos para estimar pérdidas esperadas durante futuros terremotos en centros urbanos. Aunque no es posible predecir con precisión cuándo y dónde va a ocurrir un sismo, sí es posible realizar estimaciones de cuántas víctimas y qué daños causará en la amplia variedad de edificios de diferentes características y en las redes de servicios públicos o líneas vitales. Este tipo de evaluaciones permite dimensionar la magnitud del problema que tendrá que afrontar una ciudad o una región, razón por la cual este tipo de estudios se han convertido en ineludibles y necesarios para la planificación en zonas propensas.

#### **Escenarios de daños en edificios**

En los últimos años se han venido realizando estudios de esta naturaleza mediante aplicación de metodologías para la evaluación del riesgo sísmico de centros urbanos. En primera instancia se estima la amenaza sísmica mediante un estudio de microzonificación y posteriormente se utilizan matrices o funciones de vulnerabilidad para diversos tipos de edificios que relacionan el daño potencial con la intensidad del movimiento sísmico esperado en cada sitio de la ciudad. Estas técnicas para la estimación de escenarios de pérdidas anticipadas permiten orientar las medidas de mitigación del riesgo sísmico, no sólo utilizando sus resultados para la definición de planes de emergencia o de preparativos para desastres, sino también para aportar información que permita ser utilizada en la planificación física y urbana (ATC 1985; Barbat 1998). En general, los diferentes métodos utilizados actualmente pueden clasificarse en probabilistas y deterministas, y se utilizan dependiendo del propósito del estudio.

En los métodos probabilistas la amenaza sísmica se calcula mediante técnicas de la teoría de la probabilidad. Estos métodos incluyen, en sus diferentes etapas de aplicación, la modelización geométrica de las fuentes, la distribución de magnitudes y la rata de ocurrencia para cada fuente, la atenuación del movimiento con la distancia y el análisis probabilista que determina el nivel de excedencia de los sismos que pueden afectar el sitio estudiado durante un tiempo de exposición

determinado. Una vez conocida la amenaza y su respectiva zonificación, se evalúa la vulnerabilidad por tipos de edificios y se estima el riesgo en términos de pérdidas probables. Es importante anotar que de igual forma la vulnerabilidad de las estructuras puede estimarse en términos probabilistas, dada la dispersión de los resultados que puede ofrecer un análisis de vulnerabilidad para un amplio número de edificios. Comúnmente, estos métodos son utilizados para estudios cuyos propósitos son la estimación de pérdidas económicas acumuladas y estimaciones para el cálculo de seguros.

En los métodos deterministas uno o más terremotos son postulados sin consideración explícita de la probabilidad con que dichos sucesos pueden ocurrir. Comúnmente en estos métodos se utiliza el terremoto más fuerte conocido que haya ocurrido en la región, también llamado máximo terremoto histórico. Esta modalidad parte de la premisa geofísica e intuitivamente convincente de que si un terremoto de un cierto nivel de severidad ha ocurrido una vez, éste podrá ocurrir de nuevo. Este tipo de métodos las etapas de son muy similares a las mencionadas en los métodos probabilistas, aún cuando la amenaza sísmica corresponde a un suceso específico. Estos métodos son utilizados para estudios cuyos propósitos son la evaluación de pérdidas para un terremoto específico, con fines de reducción anticipada de los daños y la determinación de un escenario para la planificación de emergencias.

En el caso de los terremotos, la vulnerabilidad física, es decir la pérdida potencial específica de los elementos expuestos y el volumen de dichos elementos son las únicas variables que pueden ser modificadas por el hombre, y una vez modificadas se puede intervenir para reducir el nivel de riesgo existente. Programas preventivos pueden mitigar o reducir el riesgo definiéndose un nivel de intervención que modifique el grado de vulnerabilidad de los elementos amenazados.

### **Escenarios de daños en líneas vitales**

Una descripción amplia de líneas vitales puede considerarse a partir de lo que se le denomina infraestructura básica o esencial:

- *Energía:* presas, subestaciones, líneas de fluido eléctrico, plantas de almacenamiento de combustibles, oleoductos, gasoductos.
- *Transporte:* redes viales, puentes, terminales de transporte, aeropuertos,

puertos fluviales y marítimos.

- *Agua:* plantas de tratamiento, acueductos, alcantarillados, canales de irrigación y conducción.
- *Comunicaciones:* redes y plantas telefónicas, estaciones de radio y televisión, oficinas de correo e información pública.

Las líneas vitales son sistemas complejos cuya función es la distribución de recursos, el transporte de personas y bienes, así como la transmisión de información. Hasta ahora, los efectos de los terremotos sólo se han considerado en el diseño de algunos componentes de estos servicios. Sin embargo, las prácticas de la ingeniería están cambiando a medida que el comportamiento de los sistemas de los servicios públicos se convierte en una preocupación reconocida en el diseño sísmico, en la planificación de emergencia y en la fase de recuperación posterior a un terremoto.

Los informes de reconocimientos posteriores a un terremoto proporcionan la mayor parte de la información existente sobre la extensión de los daños, la paralización de los servicios, y las reparaciones que se necesitan. Estos informes también sugieren de manera indirecta la manera en que la planificación de emergencias y la restauración pueden mitigar los peligros para la seguridad pública como producto de la paralización de los servicios.

Una línea vital tiene diversas características que la distinguen. A diferencia de un edificio, puede extenderse muchos kilómetros y con frecuencia debe seguir zonas marcadas por ley o propiedad. Las líneas vitales están interconectadas; por lo general son parte de redes que se extienden sobre grandes áreas. El comportamiento en una localidad de la red puede estar influenciado en gran medida por las alteraciones en una localidad distante. Por consiguiente, los servicios vitales están afectados por características sísmicas, de suelo y basamento que difieren en varias partes del mismo sistema. Estos sistemas son interdependientes; el daño de un sistema puede afectar el comportamiento de otro. La ruptura de las líneas de combustible puede ser causa de incendio, lo que debe considerarse en el uso post-terremoto de las redes de distribución de agua. Las roturas simultáneas de las líneas de agua y desagüe pueden contaminar el agua potable. La interrupción de la energía eléctrica puede afectar las estaciones de bombeo de agua, limitando por consiguiente la disponibilidad de agua y sobrecargando el sistema de transporte para extender reparaciones de emergencia. Por lo general, los daños en las líneas vitales están relacionados con el fallo del suelo.

Los modelos de vulnerabilidad sísmica relacionan la probabilidad acumulada de fallo con la intensidad del terremoto. Esos modelos pueden reflejar los efectos de la amenaza sísmica que contribuyen más al daño de un componente. En general los componentes que se encuentran sobre la superficie tienden a ser más vulnerables a los efectos vibratorios causados por fuertes sacudidas del suelo, mientras que los que se encuentran bajo la superficie tienden a ser vulnerables al desplazamiento permanente de la tierra causada por movimientos tectónicos o no tectónicos.

## 7 PREVENCIÓN SÍSMICA

Los fenómenos de origen natural y antrópico que afectan severa y continuamente a los asentamientos humanos son el resultado no sólo de la ocurrencia de los fenómenos, sino también de la alta vulnerabilidad que ofrecen dichos asentamientos como consecuencia de su desordenado crecimiento y del tipo de tecnologías utilizadas en los mismos. El riesgo puede reducirse si se entiende como el resultado de relacionar la amenaza, o probabilidad de ocurrencia de un suceso, con la vulnerabilidad o susceptibilidad de los elementos expuestos.

El aumento de la población en grandes centros urbanos, el desarrollo de tecnologías vulnerables y el deterioro del medio ambiente hacen que cuando ocurren fenómenos naturales tales como sismos, erupciones volcánicas, inundaciones, deslizamientos, etc., se producen graves daños a las personas, bienes e infraestructura, causando en muchos casos enormes pérdidas, que en ocasiones pueden llegar a afectar en forma muy severa el desarrollo económico y social de regiones o países que posteriormente tardan muchos años en recuperarse (Cardona 1990, 1991).

Por este motivo, la reducción de la vulnerabilidad debe ser, en forma explícita, un objetivo del desarrollo entendiendo como mejora no sólo de las condiciones de vida sino también de la calidad de vida y del bienestar social. La seguridad, en general, es un componente fundamental del desarrollo humano sostenible, razón por la cual la prevención es una estrategia fundamental para el justo equilibrio entre el asentamiento humano y la naturaleza.

identificar la vulnerabilidad de los elementos expuestos y analizar su origen y evolución a lo largo del tiempo permitiría identificar el tipo de medidas para neutralizar o reducir dicha vulnerabilidad mediante acciones de intervención y planificación. Metodológicamente, la identificación y análisis de la vulnerabilidad física, ambiental, social, económica, cultural, etc., es una herramienta de diagnóstico que facilita clasificar los problemas y deficiencias de desarrollo y priorizar las acciones de carácter político, económico, social y ambiental que deben realizarse para lograr un desarrollo equilibrado.

Las actividades de prevención y atención de desastres incluyen tareas tales como la realización de mapas de amenaza y determinación de zonas de máximo riesgo; instrumentación y vigilancia de fenómenos naturales; fortalecimiento institucional y financiero; dotación de centros de reservas y elaboración de planes de emergencia; educación y capacitación; incorporación de la prevención en los planes municipales y regionales de desarrollo; análisis de vulnerabilidad y reubicación de viviendas en alto riesgo, recuperación posdesastre y recuperación de cuencas hidrográficas degradadas.

Sin duda, no es posible intervenir, con fines de prevención sísmica, mediante refuerzos estructurales todos los edificios vulnerables existentes en una zona, pues en muchos lugares del mundo la mayoría han sido contruidos sin tener en cuenta los requisitos sismorresistentes modernos. Sin embargo, es una negligencia y una grave omisión no rehabilitar o reforzar desde el punto de vista sísmico al menos los edificios esenciales, tales como hospitales, cuarteles de bomberos, centrales de líneas vitales, edificios indispensables para la atención de la comunidad una vez haya ocurrido un terremoto. Sin embargo, es una obligación de la generación actual con las futuras generaciones reducir la vulnerabilidad sísmica tanto como sea posible y garantizar la aplicación del estado del conocimiento y los requisitos de diseño sismorresistente a todas las construcciones que se realizan en la actualidad, al menos para evitar que aumente la vulnerabilidad y el riesgo sísmico.

## REFERENCIAS

- [1] Applied Technology Council (1985). *Earthquake Damage Evaluation Data for California*, **ATC-13**, (FEMA), Redwood City, CA

- [2] Barbat, A. H. (1998). *El riesgo sísmico en el diseño de edificios*, Calidad Siderúrgica, Madrid.
- [3] Blakie, P., Vannon, T., Davis, I. y Wisner, B. (1992). *Vulnerabilidad, el entorno social de los desastres*, La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, Colombia.
- [4] Cardona O. D. (1986). “Enfoque metodológico para la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico”, *Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS)*, Boletín Técnico No. **33**.
- [5] Cardona, O. D. (1990). *Terminología de uso común en manejo de riesgos*, AGID Report No. **13**, EAFIT, Medellín, updated and reprinted in *Ciudades en Riesgo*, M.A. Fernández (Ed.), La RED, USAID, 1996.
- [6] Cardona O. D. (1991). “Metodología para la Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica de Edificaciones y Centros Urbanos”, *VII Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismo-Resistente - IX Jornadas Estructurales*, SCI/AIS/MOPT, Bogotá.
- [7] Cardona, O. D. (1999a). “Environmental Management and Disaster Prevention: Holistic risk assessment and management”, *Natural Disaster Management*, Ingleton J.(ed.) IDNDR, Tudor Rose.
- [8] Cardona, O. D. (1999b). *Vulnerabilidad Sísmica de Hospitales: Fundamentos para Ingenieros y Arquitectos*, Monografías de Ingeniería Sísmica, **IS-32**, CIMNE, Barcelona.
- [9] Cardona, O. D. y Barbat, A. H. (2000). *El riesgo sísmico y su prevención*. Calidad Siderúrgica, Madrid.
- [10] Elms, D. G. (1992). “Risk Assessment”, *Engineering Safety*, D. Blockley, (Ed.), MacGraw-Hill International Series in Civil Engineering, 28-46, London.
- [11] Maskrey, A. (1994). “Comunidad y desastres en América Latina: estrategias de intervención”, *Viviendo en riesgo: comunidades vulnerables y prevención de desastres en América Latina*, Allan Lavell (Ed.), LA RED, Tercer Mundo Editores, Bogotá.
- [12] Starr C. (1969). “Social Benefit vs. Technological Risk” *Science*, American Association for the Advancement of Science, **165**.
- [13] UNDRO (1979). *Natural Disasters and Vulnerability Analysis*, Report of Experts Group Meeting, Geneva.
- [14] Wikjman, A. y Timberlake, L. (1984). *Natural Disasters: Acts of God or Acts of Man?*, Earthscan, Washington, D.C.

- [15] Wilches-Chaux G. (1989). *Desastres, ecologismo y formación profesional*, SENA, Popayán, Colombia.

## ANEXO: EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

La amenaza sísmica  $H$  está definida como una probabilidad de que la intensidad sísmica  $I$  sea excedida en un período de  $T$  años. Bajo el término de intensidad se ha definido, como una medida del fenómeno, cualquier parámetro cualitativo o cuantitativo relacionado con la magnitud  $M$  de los sucesos, tales como la intensidad de la escala modificada de Mercalli, la aceleración pico del suelo, la respuesta espectral, etc. Para un sitio determinado la amenaza es una función de la sismicidad o probabilidad de ocurrencia  $p(M)$  y de la atenuación o pérdida de la energía sísmica con la distancia  $p(I/M)$

$$H = p(I) = \int p(I / M) p(M) dM \quad (1)$$

y el riesgo sísmico específico  $S$  es función de la amenaza sísmica  $H$  y de la vulnerabilidad específica  $p(D/I)$ , que es el nivel de daño  $D$  esperado que puede presentarse sobre un elemento expuesto  $E$  como consecuencia de la manifestación de un evento dado

$$S = p(D) = \int p(D / I) p(I) dI \quad (2)$$

Por lo tanto, el riesgo sísmico total  $R$  es la cuantificación de las pérdidas, conocida la vulnerabilidad de todos los elementos expuestos  $p(P/D)$ , o vulnerabilidad urbana, y el riesgo sísmico específico de cada uno de los elementos individualmente

$$R = p(P) = \int p(P / D) p(D) dD \quad (3)$$

$p(P)$ , debe entenderse ampliamente como la cuantificación de las pérdidas o como la cuantificación de la inversión realizada con anterioridad al evento con el fin de mitigar la pérdida total que causaría el desastre.

En general, se puede adoptar el uso de un índice de vulnerabilidad como un valor simple derivado de un eficiente procedimiento de inspección de

los elementos expuestos. En este caso, considerando solamente la intensidad, el daño y el índice de vulnerabilidad, las cuales son variables aleatorias puesto que se pueden considerar continuas en su rango de definición, la probabilidad del daño o pérdida puede expresarse como

$$p(P) = \iiint p(P/V, I) p(V) p(I) dI dV dP \quad (4)$$

donde  $p(P)$  es el valor de la distribución acumulada de la pérdida para  $P=P$ ;  $p(P/V, I)$  es la función de densidad condicional del daño bajo el índice de vulnerabilidad y la intensidad; y  $p(V)$  y  $p(I)$  son respectivamente las funciones de densidad para el índice de vulnerabilidad y la intensidad. Estas dos variables son estadísticamente independientes.

Para el desarrollo de mapas que ilustren las probabilidades de daño esperado la ecuación anterior podría discretizarse en diferentes rangos de nivel de daño. La ecuación tendría que ser evaluada para los dos extremos de cada rango utilizando una expresión en forma discretizada mediante el uso de sumatorias

$$p(P_i < P < P_{i+1}) = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m p(P_j < P < P_{j+1} / V_j < V < V_{j+1}, I_k < I < I_{k+1}) \quad (5)$$

$$p(V_j < V < V_{j+1}) p(I_k < I < I_{k+1})$$

Para evaluar el riesgo sísmico deben seguirse, entonces, en su orden las siguientes etapas:

- Evaluación de la amenaza sísmica a nivel global y local.
- Identificación de los elementos expuestos o amenazados.
- Definición de funciones de vulnerabilidad que relacionen las pérdidas específicas con la amenaza sísmica para los elementos expuestos.
- Evaluación de las pérdidas específicas de cada elemento expuesto y determinar su factor de participación en el efecto total de los bienes existentes.
- Evaluación de la totalidad del riesgo sísmico para la región considerada.