

# RETENCIÓN Y TRANSFERENCIA DE RIESGO SÍSMICO EN COLOMBIA

Omar D. Cardona<sup>1</sup>, Luis E. Yamín<sup>2</sup>, Santiago Arámbula<sup>3</sup> y Luis F. Molina<sup>3</sup>

## Resumen

A pesar de la considerable investigación que se ha desarrollado a nivel internacional en relación con los impactos a largo plazo de los desastres en el desarrollo sostenible, la incorporación formal del riesgo de desastre en el proceso nacional de planificación es todavía incipiente. Debido a la ausencia de una adecuada política gubernamental de retención y transferencia para cubrir posibles pérdidas por terremoto en el país, este artículo presenta una reflexión sobre las posibilidades de mejorar la eficiencia mediante herramientas técnico-científicas y financieras apropiadas. Se presenta una descripción resumida de un modelo avanzado para estimar de manera más confiable el riesgo sísmico y las pérdidas por terremoto y un resumen de resultados de dos análisis realizados con muestras de inmuebles públicos de Manizales y Bogotá a través de los cuales se demuestra la posibilidad de explorar estrategias eficientes de retención y transferencia de pérdidas desde un punto de vista financiero, lo que demuestra la posibilidad de hacer rentable la gestión integral de riesgos en el país.

## Abstract

In spite of the considerable amount of research made worldwide on relation to the disaster long-time impacts in the sustainable development, the formal inclusion of such disaster risk on the national budget planning process is still very precarious. Given the lack of an adequate governmental policy of retention and transfer of earthquake losses in the country, this paper presents ideas about the possibilities to improve the efficiency using modern scientific techniques from the risk management and financial point of view. A brief description on a advanced and reliable model to seismic risk and loss estimation is presented. Also, is presented a summary of the outcomes of two analyses made with groups of public buildings of Manizales and Bogotá, that proves the current possibility to explore efficient strategies of financial loss retention and transfer. This is an example how is possible to get a profitable integrated risk management en the country.

**Palabras clave:** gestión de riesgos, mitigación, planificación, prima pura, retención, riesgo sísmico, transferencia.

## INTRODUCCIÓN

Aunque el país incluye partidas presupuestales para la asistencia en caso de desastre y cuenta con un Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, a través del cual se hacen esfuerzos para orientar recursos hacia algunas actividades de planificación referidas a la mitigación del riesgo, en realidad Colombia no planifica ni prevé, con bases técnicas sólidas, las pérdidas esperadas por fenómenos naturales como un componente permanente de su proceso presupuestario, y como consecuencia, las políticas encaminadas hacia la reducción del riesgo a través de la incorporación de la prevención en la cultura no reciben la atención que requieren. La falta de estimaciones probabilísticas del riesgo tiene serias implicaciones. El no contar con modelos refinados que permitan estimar adecuadamente las pérdidas futuras hace que no se planifique el costo de las reconstrucciones en forma anticipada y, por lo tanto, se pierde el principal incentivo para promover la mitigación y prevención. Para reducir el riesgo se necesitan invertir en estudios y acciones que permitan orientar la manera de reducir los daños futuros de los fenómenos peligrosos. Si los futuros daños no se estiman ni se tienen en cuenta como parte del proceso de planificación actual, es casi imposible mantener recursos presupuestarios para reducir

---

<sup>1</sup> Presidente de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS. Profesor e Investigador del Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos, CEDERI, Universidad de los Andes. ocardona@uniandes.edu.co

<sup>2</sup> Profesor Asociado, Universidad de Los Andes, Director Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico, CITEC. Bogotá, Colombia. lyamin@uniandes.edu.co

<sup>3</sup> Ingeniero Investigador, Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico, CITEC, Universidad de Los Andes. Bogotá, Colombia. sarambul@uniandes.edu.co, lui-moli@uniandes.edu.co

los mencionados daños potenciales. El Estado debería contar con una adecuada y eficiente estrategia de evaluación del riesgo, con el fin de determinar qué pérdidas debería retener y/o transferir en términos financieros. Aquí se presenta un modelo avanzado de evaluación del riesgo sísmico que actualmente utilizan varias compañías de seguros en el país y que, igualmente, podría utilizar el Estado para efectos de protección económica. Se presentan algunos resultados de un estudio financiado por el Banco Mundial y Planeación Nacional, que demuestran la importancia de realizar estudios cuidadosos que permitan formular estrategias eficientes de retención y transferencia de riesgo.

## DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE RIESGO SÍSMICO

En este modelo de riesgo sísmico la amenaza se cuantifica en términos de los periodos de retorno de intensidades sísmicas relevantes en el comportamiento de las estructuras. La tasa de excedencia de una intensidad sísmica se define como el número medio de veces, por unidad de tiempo, en que el valor de esa intensidad sísmica es excedido. La determinación directa rara vez se puede hacer porque no se dispone de catálogos completos de las aceleraciones que han producido en un sitio los sismos pasados. Por lo tanto en este como en otros casos es necesario calcular la amenaza de manera indirecta. Para ello, se evalúa primero la tasa de actividad sísmica en las fuentes generadoras de temblores y después se integran los efectos que producen, en un sitio dado, los sismos que se generan en la totalidad de las fuentes. Se describe a continuación el proceso.

### Tectónica Colombiana

En el caso de Colombia las zonas más activas sísmicamente hablando están localizadas en la región andina, dominada por tres cordilleras, occidental, oriental y central. Han sido localizadas zonas de Benniof en el ambiente de Subducción, las cuales han sido identificadas mediante la ubicación de los hipocentros, esto ha llevado a establecer que dichas zonas son más superficiales mientras más al norte se encuentren, y más profundas mientras más al sur, esto involucra necesariamente un cambio en buzamiento de las zonas subducidas.

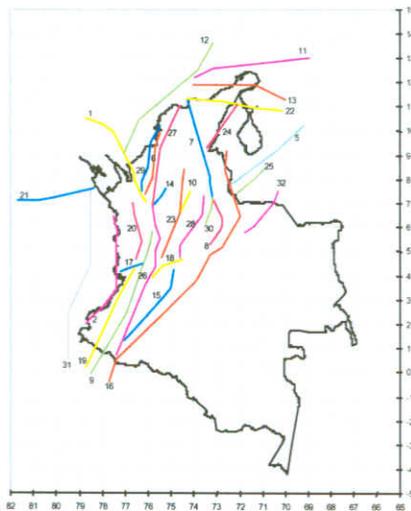


Figura 1: Distribución de fuentes sísmicas.

Además de Subducción existen en el territorio una serie de fallas geológicas activas, las cuales se encuentran limitadas por la zona de Subducción y la falla Frontal de la Cordillera Oriental. La mayor parte de estas fallas tienen dirección N-S, las que revisten mayor importancia son la Romeral y la Frontal. Con base en la información tectónica y sísmológica el estudio de amenaza sísmica de Colombia (AIS, 1996) realizó un análisis para determinar los parámetros más relevantes tales como, frecuencia de sismos  $\lambda$ , pendiente de regresión beta  $\beta$ , y magnitudes máximas  $M_u$ , y mínimas  $M_o$  de cada falla. En todos los casos se usó una base de datos correspondiente al lapso entre los años de 1957 a 1995.

El Estudio (AIS, 1996), realizó los análisis de regresión los parámetros de sismicidad para cada fuente y propuso los valores para 32 fuentes reconocidas como activas en el territorio nacional.

## Modelos de la sismicidad local

Empleando un modelo de sismicidad de Poisson la actividad de la  $i$ -ésima fuente sísmica se especifica en términos de la tasa de excedencia de las magnitudes,  $\lambda_i(M)$ , que ahí se generan. La tasa de excedencia de magnitudes mide qué tan frecuentemente se generan, en una fuente, temblores con magnitud superior a una dada. Para la mayor parte de las fuentes sísmicas, la función  $\lambda_i(M)$  es una versión modificada de la relación de Gutenberg y Richter. En estos casos, la sismicidad queda descrita de la siguiente manera:

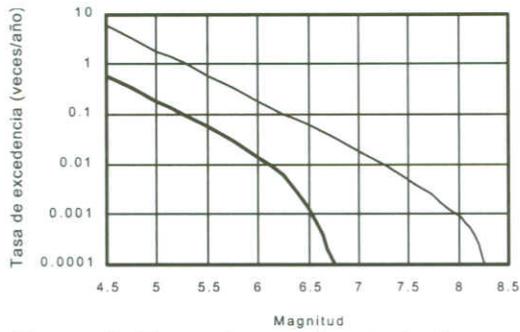


Figura 2: Tasas de excedencia de fuentes.

valor de  $M_u$ , la máxima magnitud que puede generarse en cada fuente. En la Figura 2 se muestran dos tasas de excedencia para zonas sísmicas distintas, una para una zona de alta sismicidad capaz de generar sismos con  $M > 8$  y otra de baja sismicidad.

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}} \quad (1)$$

donde  $M_0$  es la mínima magnitud relevante.  $\lambda_0$ ,  $\beta$ , y  $M_u$  son parámetros que definen la tasa de excedencia de cada una de las fuentes sísmicas. Estos parámetros, diferentes para cada fuente, se estiman por procedimientos estadísticos bayesianos, que incluyen información sobre regiones tectónicamente similares a las del país, más información experta, especialmente sobre el

## Atenuación de las ondas sísmicas

Se utilizan leyes de atenuación espectrales que toman en cuenta el hecho de que la atenuación es diferente para ondas de diferentes frecuencias, por lo que se tienen parámetros de atenuación diferentes para cada periodo de vibración considerado. Estas leyes fueron deducidas especialmente para Colombia en Gallego y Ordaz (1999) y están basadas en el cálculo de espectros fuentes, los valores extremos son hallados mediante teoría de vibraciones aleatorias. En dicho estudio se determinaron dos leyes, la “activa” para fallas continentales y la “subducción” para fallas de subducción, que se presentan en la Figura 3:

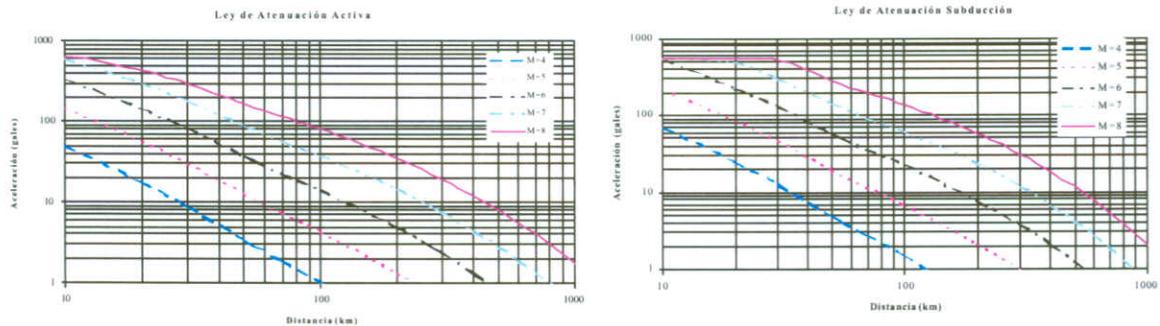


Figura 3: Leyes de atenuación de aceleración máxima del suelo para diferentes tipos de mecanismo focal.

## Efectos de la geología local

El efecto del tipo de suelo sobre la amplitud y la naturaleza de las ondas sísmicas ha sido reconocido desde hace mucho tiempo como crucial en la estimación de la amenaza sísmica. El

tratamiento consiste en hallar funciones de transferencia, mediante diversas técnicas con el fin de multiplicar estas por los espectros fuentes hallados previamente, para así obtener el espectro fuente representativo del sitio con efectos locales. En la Figura 4 se presenta la función de transferencia en un sitio muy blando de la sabana de Bogotá calculada mediante el método lineal equivalente.

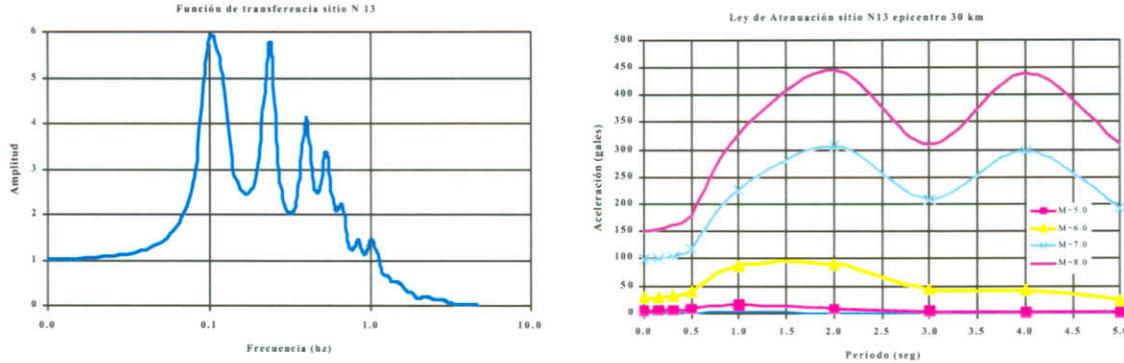


Figura 4: izq.: Función de transferencia suelo blando; der.: Ley de atenuación para distancia epicentral de 30 Km.

### Cálculo de amenaza sísmica

Una vez conocidas la sismicidad de las fuentes, los patrones de atenuación de las ondas generadas en cada una de ellas, y los efectos de la geología local, puede calcularse la amenaza sísmica considerando la suma de los efectos de la totalidad de las fuentes sísmicas y la distancia entre cada fuente y el sitio donde se encuentra la estructura. La amenaza, expresada en términos de las tasas de excedencia de intensidades  $a$ , se calcula mediante la siguiente expresión:

$$v(a | Ro, p) = \sum_{n=1}^{n=N} \int_{M_0}^{M_u} -\frac{\partial \lambda}{\partial M} \Pr(A > a | M, Ro) dM \quad (2)$$

la sumatoria abarca la totalidad de las fuentes sísmicas  $N$ , y  $\Pr(A > a | M, R_i)$  es la probabilidad de que la intensidad exceda un cierto valor, dadas la magnitud del sismo  $M$ , y la distancia entre la  $i$ -ésima fuente y el sitio  $R_i$ . Las funciones  $\lambda_i(M)$  son las tasas de actividad de las fuentes sísmicas. La integral se realiza desde  $M_0$  hasta  $M_u$ , lo que indica que se toma en cuenta, para cada fuente, la contribución de todas las magnitudes (Ordaz et al, 1998; Ordaz, 1999). Esto es adecuado para el cálculo de la prima pura de seguro ya que interesa el daño que pueden provocar inclusive los sismos pequeños y medianos que se presentan más a menudo que los sismos grandes. Conviene hacer notar que la ecuación anterior sería exacta si las fuentes sísmicas fueran puntos. En realidad son volúmenes, por lo que se han subdividido las fuentes sísmicas en triángulos, en cuyo centro de gravedad se considera concentrada la sismicidad del triángulo. La subdivisión se hace hasta alcanzar un tamaño de triángulo suficientemente pequeño como para garantizar la precisión en la integración de la ecuación anterior. En vista de que se supone que, dadas la magnitud y la distancia, la intensidad tiene distribución lognormal, la probabilidad  $\Pr(A > a | M, R_i)$  se calcula de la siguiente manera:

$$\Pr(A > a | M, Ro) = \Phi \left( \frac{1}{\sigma_{Lna}} \ln \frac{E(A | M, R_i)}{a} \right) \quad (3)$$

siendo  $\Phi(\cdot)$  la distribución normal estándar,  $E(A | M, R_i)$  el valor medio del logaritmo de la intensidad (dado por la ley de atenuación) y  $\sigma_{Lna}$  su correspondiente desviación estándar.

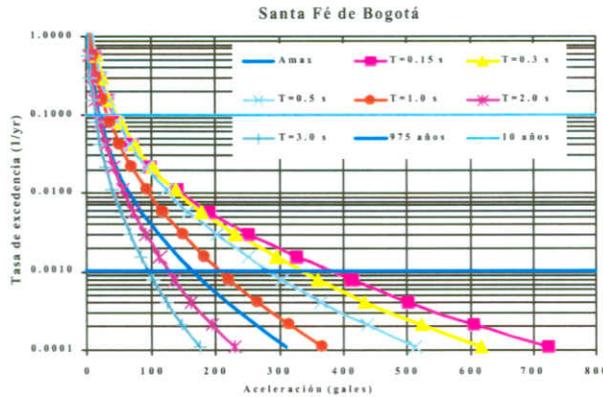


Figura 5: Tasas de excedencia para Bogotá D.C.

Una vez halladas leyes de atenuación para osciladores de diferente periodo estructural es posible encontrar espectros de amenaza o peligro sísmico uniforme en un lugar determinado a partir del valor hallado de aceleración para la tasa de excedencia prefijada al periodo de retorno, al unir los puntos de igual tasa de la Figura 5 es posible encontrar espectros de peligro uniforme a partir de los cuales se podrían obtener espectros de diseño.

### Vulnerabilidad estructural

La vulnerabilidad estructural es la relación entre la intensidad sísmica y el nivel de daño. En este enfoque la intensidad sísmica se mide con la aceleración espectral. El nivel de daño se puede estimar tomando la deriva de entrepiso como parámetro de referencia, el cual se calcula como el desplazamiento relativo entre dos niveles contiguos, dividido entre la altura del piso. Varios estudios concluyen que dicho parámetro de la respuesta estructural presenta la mejor correlación con el daño estructural registrado. (Bertero et al, 1991; Moehle, 1992; Moehle, 1996; Miranda, 1997; Priestley, 1997; Sozen, 1997). Contrario a la mayoría de sistemas que basan la estimación del daño en la Intensidad de Mercalli Modificada, el método que se emplea está basado en un parámetro que presenta una excelente correlación con el daño producido por sismos intensos. A partir de la aceleración espectral es posible determinar la máxima distorsión de entrepiso con la siguiente expresión:

$$\gamma_i = \frac{\beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 (\eta N^\rho)^2}{4 \pi^2 N h} S_a(T) \quad (4)$$

(Información sobre cómo estimar estos parámetros se encuentra en Miranda 1991, 1993 y 1997)

$\beta_1$  es la relación entre el máximo desplazamiento lateral en el nivel superior de la estructura y el desplazamiento espectral, considerando un modelo de comportamiento elástico lineal. Este factor depende del tipo estructural y del número de pisos de la estructura.

$\beta_2$  describe la relación entre la máxima distorsión de entrepiso y la distorsión global de la estructura, que se define como el máximo desplazamiento lateral en la azotea dividido por la altura total.  $\beta_2$  depende del grado de participación de las deformaciones laterales de corte y flexión, y del tipo estructural.

$\beta_3$  expresa la relación entre el máximo desplazamiento lateral del modelo de comportamiento inelástico, y el desplazamiento máximo del modelo elástico lineal. Este factor depende de la demanda de ductilidad al desplazamiento, el periodo fundamental de vibración de la estructura y el tipo de suelo que la soporta.

$\beta_4$  es la relación entre los factores  $\beta_2$  elástico e inelástico. Este factor tiene en cuenta que la distribución de la carga lateral con la altura es diferente en el modelo elástico y en el inelástico. Este factor depende del número de pisos y del nivel de deformación inelástica de la estructura, que se mide en términos de la demanda de ductilidad al desplazamiento.  $\eta$  y  $\rho$  son factores para estimar el periodo fundamental de la estructura a partir del número de pisos, N:

$$T = \eta N^{\rho} \quad (5)$$

Estos factores dependen de la ubicación de la estructura, el tipo estructural, el tipo de suelo y el año de construcción. Tienen en cuenta el hecho de que la rigidez lateral de las estructuras localizadas en zonas de alta sismicidad es mayor que el de estructuras ubicadas en zonas de baja sismicidad, y consideran que las estructuras construidas sobre suelos blandos son más flexibles debido a la flexibilidad de la cimentación. Debe anotarse que se asigna un nivel de incertidumbre en la determinación del período T, y es tomada en cuenta dentro del análisis.

h es la altura de cada piso de la estructura, que depende del tipo estructural, la ubicación geográfica y la fecha de construcción.

Sa(T) es la aceleración espectral, que depende del periodo fundamental de vibración, el amortiguamiento de la estructura y la amenaza sísmica en el sitio.

Una vez se determina la máxima distorsión de entrepiso de la estructura, su vulnerabilidad puede ser incrementada por varios factores. Algunos de estos factores son los siguientes: irregularidades en planta o en altura, golpeteo con edificaciones vecinas, daños previos no reparados, columnas cortas, etc. El valor esperado del daño de la estructura, dado un valor de distorsión máxima de entrepiso, se calcula de la siguiente forma:

$$E(\beta | \gamma_i) = 1 - \exp \left[ \ln 0.5 \left( \frac{\gamma_i}{\gamma_0} \right)^{\epsilon} \right] \quad (6)$$

donde  $\beta$  es la pérdida bruta,  $\gamma_0$  y  $\gamma_i$  son parámetros de vulnerabilidad estructural que dependen del sistema estructural y la fecha de construcción, y  $E(\cdot)$  es el valor esperado. Por definición,  $\beta$  es la proporción entre el costo de reparación y el costo total, y su valor está entre 0 y 1.

### **Evaluación de pérdidas**

La función de densidad de probabilidad de la pérdida es requerida para adelantar varios cálculos. Se asume que dicha densidad de probabilidad es Beta, con el valor esperado dado en la ecuación 6. Hay poca información para determinar la varianza de  $\beta$  dado  $\gamma_i$ ,  $\sigma^2(\beta|\gamma_i)$ . Sin embargo, se sabe que cuando el valor esperado del daño es cero, también lo es su dispersión. De igual forma cuando el valor esperado del daño es 1, la dispersión es cero. Se analizaron resultados del ATC-13 (ATC, 1985) para establecer la variación de la varianza con respecto al cambio en el valor esperado del daño. Así se realizaron simulaciones con estructuras simples, y se obtuvo la siguiente expresión para la variación de la varianza (Ordaz et al, 1998; Ordaz, 1999):

$$\sigma_{\beta}^2(\beta | \gamma_i) = Q (E(\beta | \gamma_i))^{r-1} (1 - E(\beta | \gamma_i))^{s-1} \quad (7)$$

donde 
$$Q = \frac{V_{\max}}{D_0^{r-1} (1 - D_0)^{s-1}} \quad \text{y} \quad s = \frac{r-1}{D_0} - r + 2$$

$V_{\max}$ ,  $D_0$  y  $r$  dependen del tipo estructural. Una vez se ha determinado  $E(\beta | \gamma_i)$  y  $\sigma^2(\beta | \gamma_i)$ , se establece la función de densidad de probabilidad de  $\beta$  (Ordaz et al, 1998; Ordaz, 1999).

### **Efecto de coaseguro, límite y deducible**

Hasta ahora se ha discutido la estimación de la pérdida bruta,  $\beta$ . No obstante se necesita calcular la pérdida neta  $\beta_N$ , que resulta de aplicar coaseguro, deducible y límite. Para estimar la pérdida neta se consideran las variables C, D y L, coaseguro, deducible y límite respectivamente, expresados como una fracción del valor expuesto. La pérdida neta se define de la siguiente manera:

$$\beta_N = \begin{cases} 0, & \text{if } \beta < D \\ \beta - D, & \text{if } D < \beta < L \\ L - D, & \text{if } \beta > L \end{cases} \quad (8)$$

no se incluye explícitamente el efecto del coaseguro, ya que este es una constante proporcional que afecta a la pérdida después de haber sido aplicado el deducible. Bajo estas condiciones la densidad de probabilidad de  $\beta_N|\gamma_i$  se puede expresar de la siguiente (Ordaz, 1999):

$$\begin{aligned} \Pr(\beta_N = 0) &= Ba(D, A, B) \\ \Pr(\beta_N < \beta_N) &= Ba(\beta_N + D, A, B) \\ \Pr(\beta_N = L - D) &= 1 - Ba(L, A, B) \end{aligned} \quad (9)$$

A y B corresponden a los parámetros canónicos de la distribución Beta de  $\beta$ , determinados por:

$$A = \frac{1 - E(\beta|\gamma_i) - E(\beta|\gamma_i)C^2(\beta|\gamma_i)}{C^2(\beta|\gamma_i)} \quad B = A \left[ \frac{1 - E(\beta|\gamma_i)}{E(\beta|\gamma_i)} \right] \quad (10)$$

$C^2(\beta|\gamma_i) = \sigma^2(\beta|\gamma_i)/E^2(\beta|\gamma_i)$  es el coeficiente de variación de  $\beta|\gamma_i$ , y  $Ba(x;A,B)$  es la función Beta Acumulada. Los momentos estadísticos de  $\beta_N|\gamma_i$ , como el valor esperado y la varianza pueden calcularse a partir de las expresiones dadas.

### **Cálculo de la prima pura de riesgo**

La prima pura, también conocida como prima técnica, refleja el valor de la pérdida anual esperada, que se define como el valor esperado de la pérdida que se tendría en un año cualquiera, suponiendo que el proceso de ocurrencia de los sismos es estacionario y que a las estructuras dañadas se les restituye su resistencia inmediatamente después de un sismo. Se puede calcular de la siguiente manera (Ordaz et al, 1998; Ordaz, 1999):

$$PP = \int_0^{\infty} -\frac{dv(Sa)}{dSa} E(\beta|\gamma_i(Sa)) dSa \quad (11)$$

Se tiene en cuenta la intensidad sísmica  $Sa$ , la tasa de excedencia de dicha intensidad  $v(Sa)$ , que mide el peligro sísmico, y el valor esperado del daño para dicha intensidad  $E(\beta_N|\gamma(Sa))$ , que refleja la vulnerabilidad estructural.

### **Cálculo de la pérdida máxima probable (PML)**

La pérdida máxima probable (PML) de una cartera de edificaciones es un estimador del tamaño de las pérdidas máximas que sería razonable esperar en dicha cartera durante la ocurrencia de un evento sísmico. Se utiliza como dato fundamental para determinar el tamaño de las reservas que la compañía de seguros debería mantener. En este modelo se define como la pérdida promedio que

ocurriría para un periodo de retorno determinado tal como se muestra en la Figura 12. Por lo tanto es necesario calcular las tasas de excedencia de las pérdidas netas del portafolio,  $\beta(PN)$ . Si en la  $j$ -ésima fuente se genera un sismo, la pérdida neta para el portafolio será:

$$P_{Nj} = \sum_i V_i \beta_{Nji} \quad (12)$$

donde  $V_i$  es el valor de la  $i$ -ésima estructura,  $\beta_{Nij}$  es la pérdida neta en la estructura  $i$ , si un sismo con las características determinadas ocurre en la fuente  $j$ , y la sumatoria se hace para incluir todas las edificaciones de la cartera. La determinación exacta de la función de densidad de probabilidad de  $P_{Nj}$  es bastante complicada. En este modelo se asume que la cantidad  $P_{Nj}/\sum_i V_i$  también se distribuye como una variable aleatoria Beta. Así el valor esperado de  $P_{Nj}$  se puede calcular fácilmente como sigue:

$$E(P_{Nj}) = \sum_i V_i E(\beta_{Nji} | \gamma_{ij}) \quad (13)$$

donde  $\gamma_{ij}$  es la máxima deriva de entrepiso experimentada por la estructura  $i$  si un sismo de magnitud conocida se genera en la fuente  $j$ . Sin embargo, para calcular la varianza de  $P_{Nj}$ , se debe tener en cuenta la correlación existente entre los diferentes tipos de pérdidas que se pueden generar tanto en la estructura como en los contenidos de la misma. En este modelo se asume que, dada la ocurrencia de un sismo, todas las pérdidas tienen un coeficiente de correlación de 0.3. Este valor se ha determinado al examinar carteras de edificaciones reales y calibrando el efecto de emplear diferentes valores para este coeficiente. Una vez se conoce el valor esperado y la varianza de  $P_{Nj}$ , las tasas de excedencia de  $P_N$  se pueden calcular de la siguiente manera (Ordaz et al, 1998; Ordaz, 1999):

$$\mu(P_N) = \sum_j \int_{M_0}^{M_u} -\frac{d\lambda_j(M)}{dM} \Pr(P_{Nj} > P_N | M) dM \quad (14)$$

donde  $\lambda_j(M)$  es la tasa de excedencia de la magnitud  $M$  en la fuente  $j$ , y la sumatoria tiene en cuenta los efectos de todas las fuentes sísmicas. Una vez se han realizado estos cálculos se puede determinar el PML para cada caso.

## ANÁLISIS DE UNA MUESTRA DE INMUEBLES PÚBLICOS DE MANIZALES

La ciudad de Manizales tiene asegurados todos sus inmuebles públicos, al igual que las entidades descentralizadas de la Administración Municipal. Esta situación que no es el común en los demás municipios del país, aun cuando la ley establece que es obligatorio proteger los bienes del Estado. Para este caso, de la base de datos de inmuebles de la ciudad se extrajo aleatoriamente una muestra de 35 inmuebles. Se aplicó el modelo de evaluación de la prima pura de riesgo explicado a cada una de las edificaciones, con base en la información obtenida del proyecto de microzonificación sísmica de Manizales (recientemente terminado y entregado por parte del CEDERI de la Universidad de los Andes), y en la información de las características estructurales de los edificios que se visitaron en campo. El análisis se realizó para dos situaciones: con la muestra actual de las 35 edificaciones del municipio y con un escenario donde se refuerzan las edificaciones más vulnerables. Este análisis se podría implementar con el objeto de estructurar una estrategia eficiente de negociación colectiva del seguro por parte de todas las entidades municipales. Los resultados de la evaluación de la muestra de 35 edificaciones del municipio se resumen en la Tabla 1:

**Tabla 1**  
**Resultados generales par edificaciones en Manizales, escenario actual y**  
**escenario hipotético con reforzamiento**

<b>PML ACTUAL (Tret = 1500 años)</b>	<b>\$ 2,678,519,669</b>	<b>PML REFORZADO (Tret = 1500 años)</b>	<b>\$ 1,749,646,370</b>
Como % de la suma asegurable	18.7%	Como % de la suma asegurable	12.2%
<b>PÉRDIDA ESPERADA ACTUAL</b>	<b>\$ 5,655,651,467</b>	<b>PÉRDIDA ESPERADA REFORZADA</b>	<b>\$ 4,352,463,422</b>
Como % de la suma asegurable	39.5%	Como % de la suma asegurable	30.4%
<b>PRIMA ACTUAL TOTAL</b>	<b>\$ 13,327,173</b>	<b>PRIMA REFORZADA TOTAL</b>	<b>\$ 7,577,394</b>
Como % de la suma asegurable	0.93	Como % de la suma asegurable	0.53
Como % de la prima pagada	39.6%	Como % de la prima pagada	22.5%

El valor de la prima pagada total de esta muestra, con fines de comparación es el valor que cobra la compañía de seguros, correspondiente a 2.35 % . Esta tarifa usualmente corresponde a un valor único promedio (prima *blanket*) cuando se hace una negociación global como la que se ha hecho en el pasado entre la ciudad y la compañía de seguros que cubre los inmuebles del municipio.

El valor de la Pérdida Máxima Probable, PML, es en este caso 18.7 % de los valores asegurables. Corresponde en teoría al valor que la compañía de seguros debería mantener en reservas para garantizar su solvencia en caso de presentarse la pérdida máxima en 1500 años. En Colombia la Superintendencia Bancaria exige un nivel de reservas del 15% para dicho efecto. Ahora bien, la pérdida esperada para el peor escenario determinístico corresponde a 39.5% de los valores asegurables (ver Tabla 1). Este evento, que sería generado en uno de los segmentos de la falla de Romeral, tiene un período de retorno muy superior al de 1500 años del PML.

Es muy importante anotar que el valor de la prima pura de riesgo promedio calculada con el rigor científico del modelo utilizado en este estudio (que se ha referenciado aquí como la prima actual de la muestra) dio el 0.93 % de los valores asegurables. Esta cifra corresponde aproximadamente a 39.6% de la prima cobrada para el mismo grupo de edificaciones por la compañía de seguros (ver Tabla 1). Suponiendo que la estimación de la prima para todo el grupo de inmuebles de Manizales diera un valor similar, teniendo en cuenta que al valor de la prima pura se le adicionan gastos administrativos, utilidades y otros, una vez ajustada a su valor comercial, existiría la posibilidad de conseguir una cifra más favorable que la que se ha pagado hasta ahora. Un análisis de este tipo, además, permitiría determinar las pérdidas esperadas (primas) diferentes y más realistas para cada edificación, de acuerdo con los estudios locales de amplificación sísmica y la vulnerabilidad de las estructuras, aspecto que también sería de beneficio para la compañía de seguros.

También se hizo una evaluación de las primas puras de riesgo considerando que las edificaciones se reforzaran o actualizaran al nivel de las exigencias sismorresistentes vigentes. Esta situación hipotética reduce el valor del PML a 12.2%, el valor del peor escenario a 30.4% y el valor de la prima pura promedio a 0.53%, lo que corresponde al 22.5% de la prima pagada (ver Tabla 1). Esto ilustra el beneficio de intervenir la vulnerabilidad sísmica de las estructuras y cómo esta intervención se vería reflejada en la reducción de las pérdidas y, por lo tanto, en el costo de los seguros. Es importante anotar que la reducción del valor del PML a causa del reforzamiento estructural en este caso es cercano a los 1,000 millones de pesos. Al compararse esta cifra con el costo de los refuerzos estructurales se podría determinar la conveniencia de hacer una inversión masiva. Este tipo de análisis resulta más adecuado si se estudia todo el inventario, pues la decisión de reforzar una u otra edificación se podría determinar después de estimar el beneficio en cada caso particular. A través de evaluaciones de esta naturaleza y de la valoración del costo de

los reforzamientos individuales se podrían identificar y priorizar las acciones de mitigación que tendrían mayor justificación económica.

En el caso de Manizales, dado que se cuenta con los valores totales asegurables de toda la base de datos de las edificaciones del municipio y, además, se conoce el valor total de la prima pagada por dichos inmuebles (ver Tabla 2), del estudio de la muestra se pueden hacer algunas estimaciones globales que indican que existe la posibilidad de obtener importantes ahorros para el municipio si el valor de las primas estimadas con el modelo para la muestra es similar al obtenido para el inventario completo del grupo de edificaciones.

**Tabla 2**  
**Resultados con respecto al total de la ciudad**

SUMA ASEGURABLE TOTAL MANIZALES	\$ 132.434.234.066
PRIMA TOTAL MANIZALES	\$ 306.070.418
SUMA ASEGURADA TOTAL	\$ 45.234.043.983
Como % del total de Manizales	34.2%
PRIMA PAGADA ANALIZADOS	\$ 106.300.003
Como % de Prima Pagada Manizales	34.7%
PRIMA ACTUAL TOTAL	\$ 162.531.151
Como % de Prima Pagada Manizales	53.1%
PRIMA REFORZADA TOTAL	\$ 95.355.603
Como % de Prima Pagada Manizales	31.2%

Ahora bien, la modelación realizada permite además estimar los valores de las primas puras de riesgo para diferentes límites de cobertura iniciando en un millón de dólares hasta cinco millones, lo cual se presenta en la Tabla 3. Este análisis puede resultar bastante atractivo dado que permite estudiar alternativas de protección, combinando la contratación del seguro con la retención de riesgo, lo cual puede explorarse si se constituye, por ejemplo, un fondo de reservas para cubrir el exceso de pérdidas. Dado el tamaño de la muestra, la estimación en este caso sólo es válida para las dos primeras capas de millón de dólares. La prima pura se reduciría a 0.86 % (con respecto a la Tabla 1) si sólo se contrata la capa del primer millón de dólares y el exceso de pérdida por encima de este límite se retiene o se negocia con otra compañía de seguros de ser conveniente. En caso de realizarse este estudio con todo el inventario de edificaciones la estimación por capas sería de especial interés para la negociación del seguro.

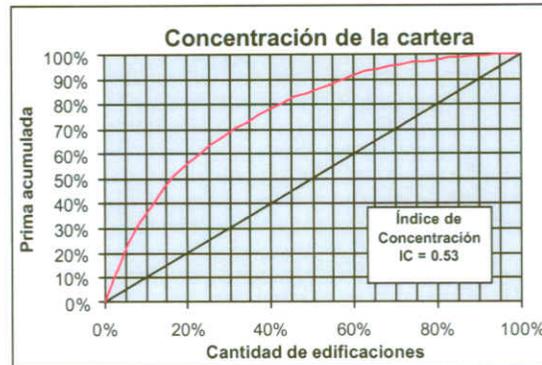
**Tabla 3**  
**Resultados a primera pérdida del grupo de edificaciones en Manizales US\$1' aUS\$5'**

LÍMITE SUPERIOR DE COBERTURA	LÍMITE SUPERIOR DE COBERTURA (MILLONES DE DÓLARES - TRM = 5 2000)				
	1'	2'	3'	4'	5'
<b>ESCENARIO ACTUAL</b>					
Prima por capas (millones de \$)	\$ 12.277.685	\$ 13.199.267	\$ 13.221.300	\$ 13.325.092	\$ 13.326.699
Prima por capas (al millar)	0.86	0.92	0.92	0.93	0.93
Como % de la prima del escenario	92.13%	99.04%	99.21%	99.98%	100.00%
Delta de prima entre capas (al millar)	-	6.44%	0.15%	0.73%	0.01%
Como % de la prima del escenario	-	6.92%	0.17%	0.78%	0.01%
<b>ESCENARIO REFORZADO</b>					
Prima por capas (millones de \$)	\$ 7.166.165	\$ 7.550.529	\$ 7.574.996	\$ 7.576.211	\$ 7.577.124
Prima por capas (al millar)	0.50	0.53	0.53	0.53	0.53
Como % de la prima del escenario	94.57%	99.65%	99.97%	99.98%	100.00%
Delta de prima entre capas (al millar)	-	2.69%	0.32%	0.02%	0.01%
Como % de la prima del escenario	-	5.07%	0.61%	0.03%	0.02%

Otro insumo importante de utilidad es la estimación que se obtiene con el modelo del índice de concentración del grupo de edificaciones. Este índice permite determinar si un grupo menor de inmuebles concentran una importante parte de las pérdidas esperadas. En el caso de la muestra de edificaciones del municipio este índice es de 0.53. De la Figura 6 se puede determinar, por ejemplo, que el 20% de los edificios analizados, constituyen algo más del 55% de las pérdidas de toda la muestra. Este tipo de resultado sirve para dirigir la atención hacia aquellos casos que

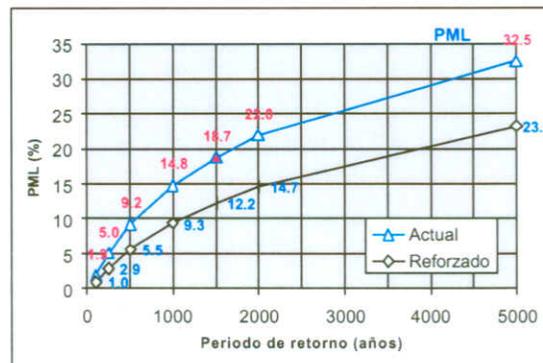
deben revisarse cuidadosamente o bien para darles un tratamiento especial en la negociación del seguro.

**Figura 6.**  
*Índice de concentración para el grupo de edificaciones de Manizales*



La Pérdida Máxima Probable, PML, varía según sea el período de retorno al que se haga referencia. No existe un estándar y por esta razón la Figura 7 presenta una curva que indica los valores desde 0 hasta 5000 años. En Colombia como en México se ha utilizado usualmente 1500 años para definir el nivel de reservas que garanticen la solvencia de las compañías de seguros.

**Figura 7.**  
*Pérdida máxima probable para el grupo de edificaciones de Manizales*



## ANÁLISIS DE UNA MUESTRA DE INMUEBLES PÚBLICOS DE BOGOTÁ

El valor de la prima pagada total de esta muestra para el 2002 es de 2.5 ‰. Esta tarifa es la determinada por la compañía de seguros a modo de prima promedio o *blanket* para la ciudad, aunque en ocasiones puede cambiar si se identifican factores que hacen más probables las pérdidas. En el caso de las edificaciones descentralizadas esta tarifa se ha estimado en 2.31 ‰ para cada edificación individualmente. Los resultados de la evaluación de la muestra de 80 edificaciones públicas localizadas en el distrito capital arrojaron los resultados indicados en la tabla 4. El valor de la prima pura de riesgo promedio calculado con el rigor científico del modelo utilizado en este estudio (prima de la muestra con las edificaciones en las condiciones actuales) dio el 1.16‰ de los valores asegurable. Esta cifra corresponde a menos de la mitad (46.3%) de la prima cobrada para el mismo grupo de edificaciones por la compañía de seguros. Suponiendo que

la estimación de la prima para todo el grupo de inmuebles públicos nacionales en Bogotá diera un valor similar a esta muestra, existiría la posibilidad de conseguir una prima más favorable con respecto al valor promedio estipulado actualmente.

**Tabla 4**  
**Resultados generales grupo de edificaciones en Bogotá, escenario actual y escenario hipotético reforzado**

<b>PML ACTUAL (Tret = 1500 años)</b>	<b>\$ 15.993,415,234</b>	<b>PML REFORZADO (Tret = 1500 años)</b>	<b>\$ 7.982,286,863</b>
Como % de la suma asegurable	7.0%	Como % de la suma asegurable	3.5%
<b>PÉRDIDA ESPERADA ACTUAL</b>	<b>\$ 16,728,620,075</b>	<b>PÉRDIDA ESPERADA REFORZADA</b>	<b>\$ 7,856,743,530</b>
Como % de la suma asegurable	7.4%	Como % de la suma asegurable	3.5%
<b>PRIMA ACTUAL TOTAL</b>	<b>\$ 263,398,499</b>	<b>PRIMA REFORZADA TOTAL</b>	<b>\$ 94,328,995</b>
Como % de la suma asegurable	1.16	Como % de la suma asegurable	0.41
Como % de la prima pagada	46.3%	Como % de la prima pagada	16.6%

Esto indica que sería beneficioso realizar la evaluación para la totalidad de los predios públicos nacionales e incluso distritales, a fin de obtener el valor de las primas para todas las edificaciones públicas de la ciudad. Los resultados indicarían los valores de las primas puras de uno a uno de los edificios y se podría hacer una negociación masiva y obtener para la nación o el distrito un valor muy favorable. Un análisis de este tipo, además, permitiría determinar las pérdidas esperadas (primas) diferentes y más realistas para cada edificación, de acuerdo con los estudios locales de amplificación sísmica y la vulnerabilidad de las estructuras, aspecto que también es de especial interés para las compañías de seguros.

El valor de la Pérdida Máxima Probable, PML, es en este caso 7.0 % de los valores asegurables. Corresponde en teoría al valor que la compañía de seguros debería mantener en reservas para garantizar su solvencia en caso de presentarse la máxima pérdida en 1500 años. En Colombia la Superintendencia Bancaria exige un nivel de reservas del 15% para dicho efecto. Ahora bien, la pérdida esperada para el peor escenario determinístico corresponde a 7.4% de los valores asegurables (ver Tabla 4).

Al igual que en el caso anterior, se hizo una evaluación de las primas puras de riesgo considerando que las edificaciones se reforzaran o actualizaran al nivel de las exigencias sismorresistentes vigentes. Esta situación hipotética reduce el valor del PML y del peor escenario a 3.5% y el valor de la prima pura promedio a 0.41 %, lo que corresponde al 16.6 % de la prima pagada (ver Tabla 3.13). La reducción del valor del PML a causa del reforzamiento estructural en este caso es del orden de 8,000 millones de pesos.

**Tabla 5**  
**Resultados a primera pérdida del grupo de edificaciones en Bogotá US\$1' a US\$5'**

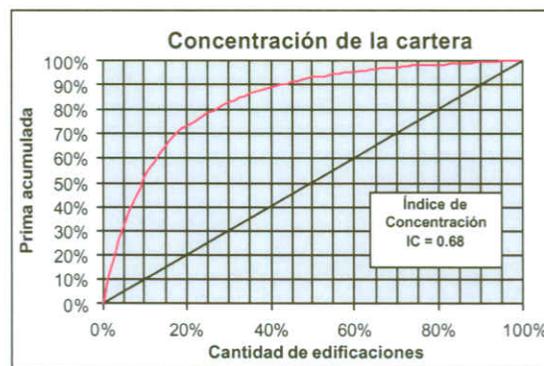
LÍMITE SUPERIOR DE COBERTURA	LÍMITE SUPERIOR DE COBERTURA (MILLONES DE DÓLARES - CRM - \$ 2009)				
	1'	2'	3'	4'	5'
<b>ESCENARIO ACTUAL</b>					
Prima por capas (millones de \$)	\$ 183,092,537	\$ 220,714,087	\$ 238,509,229	\$ 248,468,367	\$ 254,146,808
Prima por capas (al millar)	0.81	0.97	1.05	1.09	1.12
Como % de la prima del escenario	69.51%	83.79%	90.55%	94.33%	96.49%
Delta de prima entre capas (al millar)	-	16.55%	7.83%	4.38%	2.50%
Como % de la prima del escenario	-	14.28%	6.76%	3.78%	2.16%
<b>ESCENARIO REFORZADO</b>					
Prima por capas (millones de \$)	\$ 75,948,971	\$ 86,374,478	\$ 90,548,011	\$ 92,457,776	\$ 93,367,494
Prima por capas (al millar)	0.33	0.38	0.40	0.41	0.41
Como % de la prima del escenario	80.51%	91.57%	95.99%	98.02%	98.98%
Delta de prima entre capas (al millar)	-	4.59%	4.42%	2.02%	0.96%
Como % de la prima del escenario	-	11.05%	10.67%	4.88%	2.32%

Al estimar los valores de las primas puras de riesgo para diferentes capas o límites de cobertura se puede ilustrar lo atractivo que resulta estudiar varias alternativas de protección de contratos a

primera pérdida. La prima pura se reduciría a 0.81 ‰ (el 69.5% de la prima total) si sólo se contrata la capa del primer millón de dólares, a 0.97 ‰ (el 83.8% de la prima total) para el segundo millón de dólares, a 1.05 ‰ (el 90.6% de la prima total) para el tercer millón de dólares, y así en forma sucesiva (ver Tabla 5). El exceso de pérdida por encima de estos límites se podría retener, mediante un fondo de reservas y/o compensación del Estado, que puede ser el resultado de un consorcio con las compañías privadas, o negociar con reaseguradores de ser conveniente.

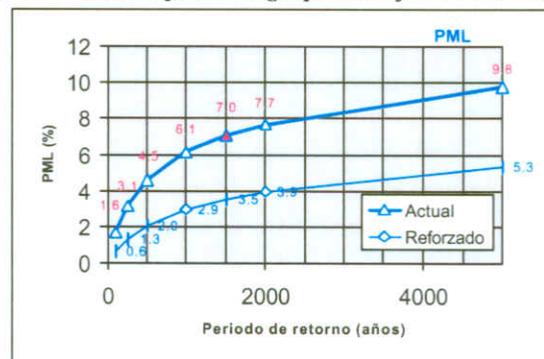
En determinados casos podrían plantearse situaciones en las cuales se puede retener el riesgo hasta un límite que se considere conveniente y comprar el seguro en condiciones favorables a partir de un límite de exceso de pérdida (*attachment point*) a partir del cual que empezaría a involucrar, por ejemplo, seguro o reaseguro. En caso de realizarse este estudio con todo el inventario de edificaciones públicas en Bogotá la estimación por capas o por PMLs sería de especial interés para definir una estrategia eficiente de transferencia de riesgo.

**Figura 5.**  
**Índice de concentración grupo de edificaciones Bogotá**



En el caso de la muestra estudiada de Bogotá, el índice de concentración del grupo de edificaciones fue de 0.68 (ver Figura 3.5). Las curvas de PML presentan cambios muy notables si la muestra es con las edificaciones en las condiciones actuales o si es con edificaciones reforzadas (ver Figura 6).

**Figura 6.**  
**Pérdida máxima probable grupo de edificaciones Bogotá**



De analizarse todo el inventario de edificaciones públicas completo de la nación en Bogotá y otras ciudades del país, una herramienta como el modelo aquí aplicado, utilizando técnicas refinadas de modelación y los avances técnico-científicos facilitaría, como ya se indicó, el diseño de una

estrategia eficiente y realista de negociación para la protección de los inmuebles públicos de la ciudad. El país debería contar con estos análisis permanentemente y diseñar, con base en estos estudios, su estrategia de transferencia de las pérdidas en una forma dinámica.

## **RECOMENDACIONES**

El gobierno debería tratar de medir de manera idónea el riesgo por desastres. Existen técnicas para estimar el riesgo con base en modelos avanzados que han sido ya utilizados en los países desarrollados. La aplicación de este tipo de modelos en los países en vías de desarrollo ha sido limitada, dado que no ha existido un amplio mercado de seguros privados para riesgos por fenómenos naturales. En Colombia este tipo de modelación a empezado ha ser utilizada y financiada por algunas compañías de seguros. Sin embargo, para que se puedan emplear este tipo de modelos de manera efectiva, es necesario contar con datos confiables sobre las amenazas y la vulnerabilidad de los bienes. En Colombia las amenazas están más o menos bien definidas, pero no se cuenta con análisis de vulnerabilidad y por lo tanto de riesgo adecuados, con algunas excepciones. Por lo tanto, es esencial que el gobierno comprenda y evalúe el riesgo de desastre para que planifique en lugar de limitarse a responder ante los hechos. Estos modelos avanzados con sólidas bases técnicas y científicas deben aplicarse en el ámbito nacional, regional y municipal. Además, es necesario utilizarlos para estimar con mayor confianza el riesgo de la infraestructura y de los edificios esenciales, las escuelas, etc.

Es claro que el gobierno nacional es responsable de la reconstrucción de los edificios públicos más importantes en caso de desastre, por lo tanto la transferencia de pérdidas debería formar parte de un programa de gestión cuidadoso que permita asignar los recursos de manera eficiente. Las prácticas actuales indican que no hay una estrategia informada del gobierno, que podría ser más inteligente y unificada para efectos de eficiencia, aunque la contratación de seguros se realice en forma independiente por cada entidad. Usualmente los contratos de seguros de los gobiernos son para proteger niveles de daño relativamente altos. La parte más costosa de un seguro es la que cubre niveles menores de daño; cobertura que no es precisamente la que más se necesita. Además, si cada dependencia gubernamental contrata su propio seguro, se pierde el beneficio de la reducción de tarifas y la mayor cobertura que se obtendría si se negocian los seguros de todos los edificios públicos. La descentralización de la compra del seguro sólo tiene sentido si la entidad descentralizada que contrata los seguros realmente asume las pérdidas. Pero si en realidad es el gobierno nacional el que se hace responsable de las pérdidas que el seguro no cubre en muchos de los casos, éste debería orientar la decisión de contratación del seguro, en cuyo caso, es probable que se pueda contratar un seguro mucho mejor, que esté más acorde con las necesidades del gobierno e implique menores costos. Un proceso de contratación unificado haría de los seguros vigentes un componente muy importante del proceso de gestión del riesgo del país y un estímulo para la planificación de la mitigación..

## **CONCLUSIONES**

Se puede afirmar que el uso sólo de información histórica y de un enfoque empírico para pronosticar pérdidas de desastre es insatisfactorio. Las estimaciones que resultan de estas evaluaciones actuariales tradicionales contienen incertidumbres muy grandes. Estas incertidumbres sólo pueden ser controladas utilizando técnicas más rigurosas de estimación independientes, como los modelos basados en estudios de ingeniería y enfoques científicos más depurados. Cuando existe alta ambigüedad del riesgo, es decir cuando hay una alta incertidumbre en relación con la probabilidad de ocurrencia de una pérdida específica y su magnitud, el valor de la prima será

inevitablemente mayor. Los actuarios y suscriptores de las compañías de seguros y reaseguros manifiestan aversión a la ambigüedad al definir un valor mayor de las primas cuando se percibe que el riesgo no está bien especificado. Por lo anterior se requiere de modelos especiales.

El Estado Colombiano podría explorar modalidades para proteger contra desastres e incluso terrorismo los bienes públicos, incluida la infraestructura, transfiriendo en forma eficiente las pérdidas a la industria de seguros privados, a los reaseguradores e incluso al mercado de capitales. También podría utilizarse la figura equivalente de la contratación de créditos contingentes, para garantizar la disponibilidad de recursos en caso de una reconstrucción. Países como España o como Francia tienen desde tiempo atrás un sistema de respaldo a los aseguradores privados por parte del Estado. De las pólizas de seguros que se suscriben, un porcentaje se cobra adicional, excepto en caso de los seguros de vida, para alimentar un fondo que sirve para compensar los excesos de pérdidas por desastres de las compañías de seguros privadas. En Inglaterra, igualmente, los aseguradores privados asumen una primera capa y posteriormente sigue un fondo en el que participa el Estado. Este tipo de figuras, además se apoyan en la industria del reaseguro mediante esquemas proporcionales o a partir de ciertos límites de exceso de pérdidas. Son en realidad un *pool* o mutualidad, también denominado por algunos como consorcio, en el que participan las compañías privadas y el Estado. Incluso, no sería descartable que en una figura de esta naturaleza pudieran participar los organismos multilaterales a partir de ciertos límites o capas antes de que lo haga el gobierno o viceversa.

Para la cobertura por desastre de los estratos más pobres de la población incluso se podría pensar en pagos subsidiados basados en la solidaridad de otros estratos de mayores ingresos, con tarifas diferenciadas, como se ha hecho en el caso del seguro agropecuario en algunos países. La prima del seguro por terremoto, por ejemplo podría ser asumida en parte por el asegurado y en parte por el fondo o consorcio, con el fin de incentivar el seguro; y de paso hacer explícita la responsabilidad en el ciudadano de autoprotgerse, lo cual debería ser parte de los procesos de cultura ciudadana. En Turquía, después del terremoto de Mármara de 1999, con el apoyo del Banco Mundial se creó un consorcio, previo un ajuste de orden legal que obliga la suscripción del seguro de terremoto hasta un mínimo de US\$ 25,000 dólares, con el fin de proteger a todos los propietarios de vivienda. Dicho consorcio está integrado por el gobierno y los aseguradores privados, que suscriben el seguro. Algunas ideas de este tipo se han venido discutiendo también recientemente en algunos países como los centroamericanos.

Cambios rápidos en el sector financiero están permitiendo la aparición de nuevas alternativas para enfrentar las pérdidas causadas por fenómenos peligrosos como los terremotos, huracanes, inundaciones, entre otros. El mercado de capitales es global y permite la posibilidad que se puedan realizar inversiones en diferentes sitios del mundo. La combinación de los nuevos conocimientos y técnicas de la ingeniería y la ciencia, lo que incluye la modelación más precisa de pérdidas y un mejor entendimiento científico del riesgo, los avances en la computación y la tecnología de la información y las innovaciones en el mercado financiero están abriendo nuevos horizontes y nuevas fuentes de capital para enfrentar las pérdidas debidas a desastres

## REFERENCIAS

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS)., (1996): “Estudio de amenaza sísmica de Colombia”, Universidad de los Andes, Ingeominas.

- Bertero, V.V., Anderson, J.C., Krawinkler, H., and Miranda, E., (1991): "Design Guidelines for Ductility and Drift Limits: Review of the State-of-the-Practice and State-of-the-Art in Ductility and Drift-Based Earthquake-Resistant Design of Buildings", Report No. UCB/EERC-91/15, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- Gallego, M., (2000): Estimación de riesgo sísmico en la República de Colombia, tesis presentada como requisito parcial para obtener el grado de maestro en Ingeniería, DEPFI., UNAM.
- Ingeominas y Universidad de Los Andes, (1997): Microzonificación Sísmica de Santa Fe de Bogotá., publicaciones Ingeominas., Ministerio de Minas y Energía.
- Miranda, E., (1991): Seismic Evaluation and Upgrading of Existing Buildings, Thesis submitted for partial satisfaction of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy in Engineering, University of California at Berkeley, May 1991.
- Miranda, E., (1993): Evaluation of Site-Dependent Inelastic Seismic Design Spectra, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 5.
- Miranda, E., (1997): "Estimation of Maximum Interstory Drift Demands in Displacement-Based Design," Seismic design Methodologies for the Next Generation of Codes, H. Krawinkler and P. Fajfar editor, Balkema.
- Moehle, J.P., (1996): "Displacement-Based Seismic Design Criteria", " Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, June.
- Ordaz, M., Miranda, E., Reinoso, E., Pérez-Rocha, Luis E., (1998): Seismic Loss Estimation Model For México City.
- Ordaz, M. (1999): Metodología para la Evaluación del Riesgo Sísmico Enfocada a la Gerencia de Seguros Por Terremoto.
- Ordaz, M. y Gallego, M., (1999): Estimación de leyes de atenuación para Colombia, Revista internacional de estructuras Quito., II-1999.
- Priestley, M.J.N., "Displacement-Based Seismic Assessment of Reinforced Concrete Buildings," Journal of Earthquake Engineering, Vol. 1 No. 1, pp. 157-192, 1997.
- Sozen, M.A., "Drift-Driven Design for Earthquake Resistance of Reinforced Concrete," (1997): Proc. EERC-CUREe Symposium in Honor of Vitelmo V. Bertero, Berkeley, California.