

IE - RISS: UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS POR SISMO EN EDIFICACIONES

IE - RISS: A COMPUTER TOOL FOR ESTIMATING EARTHQUAKE LOSSES IN BUILDINGS

CÉSAR AUGUSTO SIERRA ÁLVAREZ

Magister en Ingeniería UNIVERSIDAD EAFIT, csierraa@eafit.edu.co

JUAN DIEGO JARAMILLO FERNÁNDEZ

Profesor UNIVERSIDAD EAFIT, jjarami@eafit.edu.co

Recibido para revisar Julio 28 de 2011, aceptado Abril 25 de 2012, versión final Mayo 15 de 2012

RESUMEN: Una formulación probabilista para estimar tasas de excedencia de pérdidas por terremoto es presentada. Luego de exponer la utilidad de este tipo de modelos se presenta la formulación matemática de un modelo Poissoniano que considera la incertidumbre de variables tales como: magnitud en la fuente, intensidad del movimiento en el basamento rocoso, intensidad del movimiento a nivel de la superficie del suelo y daño en las edificaciones. Los resultados se sintetizan en las tasas de excedencia anual para un nivel de pérdida determinado, ya sea para cada una de las edificaciones afectadas, para un grupo de ellas o para todo el conjunto. Finalmente, para una cartera ficticia que considera diferentes combinaciones de tipos de edificaciones, tipos de suelo y localizaciones geográficas, se calculan las tasas de excedencia de pérdidas. Los resultados muestran cómo las pérdidas podrían ser fuertemente influenciadas por la ubicación y por el sistema estructural de las edificaciones.

PALABRAS CLAVE: magnitud del sismo, ecuación de atenuación, amenaza, vulnerabilidad, Pérdida Máxima Probable.

ABSTRACT: A probabilistic formulation for evaluating loss exceedance rates associated to earthquake is presented. First, the usefulness of such models is exposed; later, it is presented the mathematical formulation of a Poissonian model which considers the uncertainty in variables such as: the earthquake magnitude, the ground motion intensity at basement rock, the ground motion intensity at surface level and the damage at the buildings. The results are summarized by the annual exceedance rates for a given level of loss. It could be obtained for only one building, for a group of buildings or for the whole set of affected buildings. At last, for an assumed portfolio where are considered different combinations of types of buildings, types of soils and geographic location, the loss exceedance rates are calculated. The results show how estimated losses could be strongly influenced for the location and the kind of the structural system of the buildings.

KEYWORDS: earthquake magnitude, attenuation relations, hazard, vulnerability, Probable Maximum Loss.

1. INTRODUCCIÓN

La estimación de pérdidas físicas y de otra índole debida a fenómenos naturales ha sido tema de investigación y de interés en los últimos años por parte de la comunidad académica, del gremio de los seguros y de algunas entidades gubernamentales. El sector asegurador se ha preguntado por ejemplo, ¿Cómo estimar el valor esperado de las pérdidas de un grupo de bienes sometidos a acciones sísmicas? ¿Qué tanto influyen sobre las pérdidas y el valor de la prima, algunas condiciones de la póliza tales como deducibles, límites, coaseguros, entre otros? Por otro lado, los centros de atención de desastres de carácter gubernamental pueden usar las estimaciones de

pérdidas con el fin de elaborar planes de contingencia y optimización de recursos.

Para dar respuesta a estas necesidades se han desarrollado herramientas computacionales que con mayor o menor grado de sofisticación tratan de responder este tipo de preguntas. Por ejemplo, el sistema CAPRA (Probabilistic Risk Assessment) [1], para el caso particular de evaluación de riesgo sísmico, utiliza una estrategia enteramente similar a la utilizada en la herramienta computacional IE-RISS que se desarrolló como parte de este proyecto y que se expone con detalle más adelante. Otras aproximaciones, como la del programa HAZUS [2], hace menos énfasis en la descripción probabilista de la amenaza y centra

sus esfuerzos en una muy detallada descripción de la respuesta de los sistemas en estudio a los diferentes niveles de amenaza.

Para este trabajo se desarrolló un programa de cómputo que combina los aspectos físicos del fenómeno y los requerimientos de las compañías aseguradoras. El IE-RISS es una herramienta computacional concebida para la estimación de pérdidas por terremoto que usa un tratamiento probabilista de las variables que controlan el fenómeno. El desarrollo de la herramienta se ha realizado durante los últimos 10 años, y todas las etapas del desarrollo han sido el producto de proyectos de cooperación entre la UNIVERSIDAD EAFIT y la empresa INTEGRAL, S. A, Ingenieros Consultores, que han contado con el apoyo determinante de COLCIENCIAS.

2. MODELACIÓN

Debido a la aleatoriedad en el proceso de generación de los sismos, a la aleatoriedad en la transmisión de su energía a través de la corteza terrestre, y en general al desconocimiento del fenómeno, la modelación del IE-RISS tiene un enfoque probabilista que tiene en cuenta de manera explícita la incertidumbre en todas las etapas en las que hoy se divide el fenómeno.

La estimación se inicia con la tasa de ocurrencia de eventos sísmicos en cada una de las fuentes sismogénicas que pudieran afectar la región en donde están emplazadas las edificaciones de la cartera. A partir de esta tasa de ocurrencia de eventos en una fuente sismogénica, el proceso se reduce a una serie de transformaciones de la(s) variable(s) que representan la intensidad del fenómeno o la respuesta al fenómeno en sus diferentes etapas. En cada una de estas transformaciones se considera la incertidumbre asociada teniendo en cuenta todas las posibilidades y sus probabilidades asociadas. El problema básico que debe resolverse para un solo bien o estructura en este caso se plantea en (1):

$$v(perd) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \int_{m_0}^{m_u} \int_{a_{f_0}}^{a_{f_u}} \int_{a_{r_0}}^{a_{r_u}} \int_{a_{s_0}}^{a_{s_u}} Pr(p \geq perd/a_s) f_{As/Ar}(a_s/a_r) f_{Ar/Af}(a_r/a_f) f_{Af/M}(a_f/m) f_M(m) da_s da_r da_f dm$$

$$f_{Af/M}(a_f/m) f_M(m) da_s da_r da_f dm \tag{1}$$

En donde la tasa de excedencia para un valor determinado de pérdida, $v(perd)$, se estima a partir del teorema de las probabilidades totales, en donde λ_i es la tasa de ocurrencia de sismos en la fuente i , m_0 y m_u son la magnitud mínima y la magnitud máxima de la fuente, respectivamente, a_{f_0} , a_{r_0} y a_{f_u} , a_{r_u} son las aceleraciones en roca debidas a la fuente y al trayecto, mínimas y máximas, respectivamente; y a_{s_0} y a_{s_u} son las aceleraciones en la superficie del terreno mínima y máxima, respectivamente. Por otra parte, $f_{As/Ar}(a_s/a_r)$ es la función de densidad de probabilidad condicional de la aceleración en superficie, a_s , dada la aceleración en roca, a_r ; $f_{Ar/Af}(a_r/a_f)$ es la función de densidad de probabilidad condicional de la aceleración en roca, a_r , dada la aceleración en roca debida a la fuente, a_f ; $f_{Af/M}(a_f/m)$ es la función de densidad de probabilidad condicional de la aceleración en roca, a_r , dada la aceleración en roca debida a la fuente, a_f ; $f_M(m)$ es la función de densidad de probabilidad de la magnitud, m . Finalmente, $Pr(p \geq perd/a_s)$ es la probabilidad de que la pérdida, p , sea mayor o igual a la pérdida seleccionada, $perd$, dada la intensidad en la superficie, a_s . Esta probabilidad se calcula a partir de un modelo de respuesta estructural a la intensidad en la base, de una función de vulnerabilidad que relaciona la respuesta estructural (deformación) con el daño, y finalmente, de las políticas de la póliza de seguros que relacionan el daño con la pérdida

De la propuesta que se acaba de hacer es claro que la dependencia del tiempo del fenómeno está representada exclusivamente por la tasa de ocurrencia de eventos en la fuente. Lo anterior significa que se asume un comportamiento poissoniano del fenómeno, es decir, que la función de densidad de probabilidades del tiempo entre eventos es de tipo exponencial, y que ésta está caracterizada por la tasa de ocurrencia de eventos en cada fuente, λ_i , como único parámetro.

2.1. Sismicidad

La sismicidad se tuvo en cuenta mediante la discretización de fuentes, sobre las cuales fue necesaria la definición de parámetros sísmicos tales como: tasa de ocurrencia de eventos, λ_i , relación entre generación de magnitudes mayores y menores, β ; parámetros para definir la función de densidad de probabilidades de las magnitudes tales

como: magnitud mínima, m_0 , magnitud última, m_u , modelo de distribución de magnitudes, y finalmente, la geometría de la fuente: azimut, profundidad, buzamiento, etc.

El modelo de distribución de magnitudes usado es de tipo exponencial, para el que, según lo propuesto en [3], la función de densidad de probabilidades de las magnitudes está dado por (2):

$$f_m(m) = \frac{\beta e^{-\beta(m-m_0)}}{1 - e^{-\beta(m_u-m_0)}}; \quad m_0 \leq m \leq m_u \quad (2)$$

El catálogo de fallas usado fue suministrado por la empresa INTEGRAL, S.A., que incluye el levantamiento de las fallas activas de Colombia.

2.2. Ecuaciones de atenuación

Las ecuaciones de atenuación permiten conocer la intensidad (aceleración, velocidad, desplazamiento, amplitud espectral, duración, etc.) en un sitio determinado, a partir de la magnitud del sismo y la distancia desde la fuente hasta el sitio de medición. Para el análisis se usaron las ecuaciones propuestas por Gallego, M en [4] tanto para fallas corticales como para fallas de subducción.

De forma general, el valor del logaritmo natural de la intensidad en roca, Lna_r , puede expresarse mediante (3):

$$Lna_r = E(Lna_r) + \varepsilon_1 N(0, \sigma_{inter}) + \varepsilon_2 N(0, \sigma_{intra}) \quad (3)$$

En donde, $E(Lna_r)$ representa el valor esperado del logaritmo natural de la intensidad en roca, $N(0, \sigma_{inter})$ es la componente aleatoria inter evento, la cual permite considerar la incertidumbre en la intensidad debida a la fuente o al tipo de rompimiento. La componente aleatoria intra evento, $N(0, \sigma_{intra})$, considera la incertidumbre en la intensidad debida a la trayectoria [5], [6]. La distribución de probabilidad de las variables aleatorias inter evento e intra evento se ajustan a un modelo probabilista de tipo Normal de media igual a cero y truncado a un valor de ε_1 y ε_2 desviaciones estándar, σ_{inter} y σ_{intra} , respectivamente [7].

2.3. Amplificación del suelo

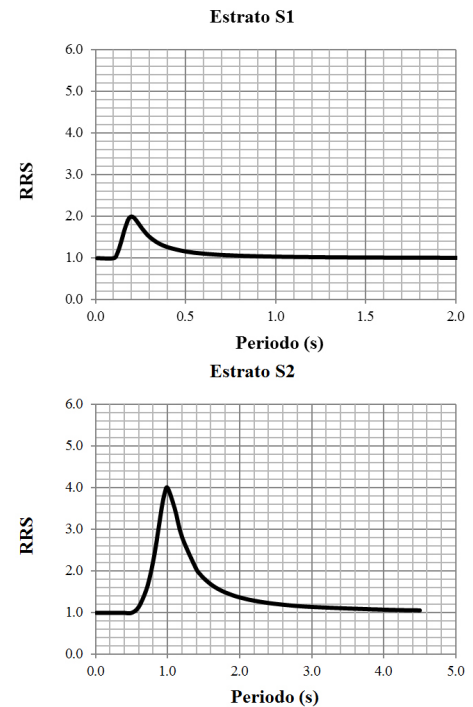
En este inciso se considera la posible amplificación o de-amplificación que puede sufrir la intensidad en superficie en función de las propiedades dinámicas de las capas de suelo superficiales en cada sector particular. Este fenómeno se considera mediante la función RRS (Radio of Response Spectra), la cual permite obtener la intensidad en superficie a partir de la intensidad en la roca.

De forma general, el logaritmo natural de la intensidad en la superficie, Lna_s , puede expresarse mediante (4):

$$Lna_s = Lna_r + E(LnRRS) + \varepsilon N(0, \sigma_{LnRRS}) \quad (4)$$

Donde Lna_s y Lna_r son los logaritmos naturales de la intensidad en superficie y la intensidad en roca respectivamente, y $E(LnRRS)$ es el valor esperado del logaritmo natural de RRS . La distribución de probabilidad de la variable aleatoria, $\varepsilon \cdot N(0, \sigma_{LnRRS})$, se ajusta a un modelo probabilístico de tipo Normal de media igual a cero y truncado a un valor de ε desviaciones estándar, σ_{LnRRS} [8].

En la Figura 1 se presentan las funciones RRS en función del periodo estructural, usadas para los tres sectores de estudio.



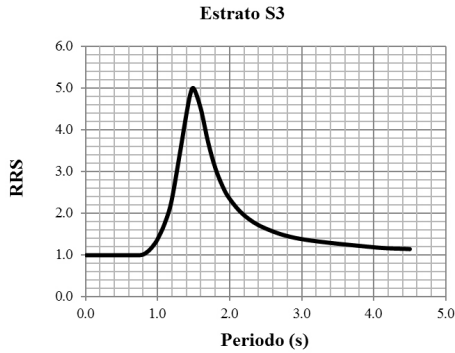


Figura 1. Funciones RRS para suelos S1, S2 y S3 que fueron considerados. Los periodos fundamentales para los estratos se suelos son iguales a 0.2 s, 1.0 s y 1.5 s, respectivamente.

2.4. Análisis de las estructuras

Para estimar la respuesta de las estructuras se consideran éstas como sistemas de un solo grado de libertad. La deriva “inelástica” (respuesta) de piso se representa por (5):

$$Deriva(Piso) = \beta_3 \frac{9,8 Sa(T) T^2}{4 \pi^2} FPM \frac{\phi(Piso)}{H} \quad (5)$$

En donde, $Sa(T)$ es la aceleración espectral en la superficie del suelo, medida en g (aceleraciones de la gravedad), T es el periodo de vibración fundamental de la edificación, medido en segundos, H representa la altura de la edificación, medida en metros, ϕ representa el desplazamiento modal, considerado, en este ejemplo, igual a 1.0, y FPM representa el factor de participación modal. Para efectos de los resultados expuestos en este artículo se consideró que el FPM era el mismo para todas las edificaciones e igual a 1.54, que corresponde al factor de participación modal del desplazamiento del último nivel de una edificación con una deformación típica por flexión.

Ahora, con el propósito de tener en cuenta los efectos de desplazamiento inelástico de la estructura se hace uso de un factor de amplificación, β_3 , conforme a la propuesta de Miranda [9], [10]. Esta amplificación es función del periodo de la estructura y de la ductilidad demandada, y esta última a su vez puede estimarse como el cociente de aceleración espectral solicitante sobre la aceleración resistente de diseño, $Sa(T)/A_r$. Esta aceleración resistente debe incluirse como

otro parámetro para definir las características de la edificación.

Es importante considerar que el tipo de funciones de vulnerabilidad propuestas en este trabajo, en función de la deriva de piso, son más adecuadas para sistemas estructurales de rigidez mediana a baja, para los que los daños correlacionan mejor con las deformaciones (derivas) que con otras variables del movimiento. Para sistemas estructurales constituidos por muros de mampostería por ejemplo, de rigideces muy altas, los daños correlacionan mucho mejor con las aceleraciones a los que son sometidos que con las deformaciones que estos movimientos generan. En este caso, las deformaciones son muy bajas haciendo esta variable inadecuada para describir el comportamiento de este tipo de sistemas. Por ejemplo, en Maldonado et al se estiman funciones de vulnerabilidad para edificaciones de mampostería en Colombia, en función de la aceleración pico efectiva del terreno, A_a .

2.5. Vulnerabilidad de las edificaciones

Para efectos de este trabajo y para mantener cierta uniformidad en las variables estudiadas de manera que se pueda llegar a conclusiones más claras, la consideración de la vulnerabilidad de las edificaciones en todos los casos se hace a partir de funciones que relacionan la deriva de piso con el porcentaje de daño que esa deriva produce, y que dependen básicamente del sistema estructural y del material de la edificación. Para este artículo se usaron tres funciones: una para estructuras rígidas y frágiles como podrían ser edificaciones de mampostería, otra para estructuras medianamente frágiles como podrían ser edificaciones de concreto reforzado con muros de mampostería adosados y finalmente otra para estructuras dúctiles como podrían ser edificaciones de acero sin muros de mampostería adosados. Dichas funciones, que se muestran en la Figura 2, fueron generadas a para de valores tomados de [12] y siguen la propuesta de Mario Ordaz para la determinación de la esperanza de la pérdida, $E(\text{daño})$, dado un valor de deriva δ_i [13].

Para tener en cuenta la incertidumbre en las funciones de vulnerabilidad se supuso que el coeficiente de variación de esta incertidumbre es función de la esperanza del valor del daño, $E(\text{daño})$, lo que permite considerar el hecho de que para valores muy bajos

o muy altos del daño la incertidumbre es muy baja: casi se tiene la certeza de que el daño es nulo o total, respectivamente.

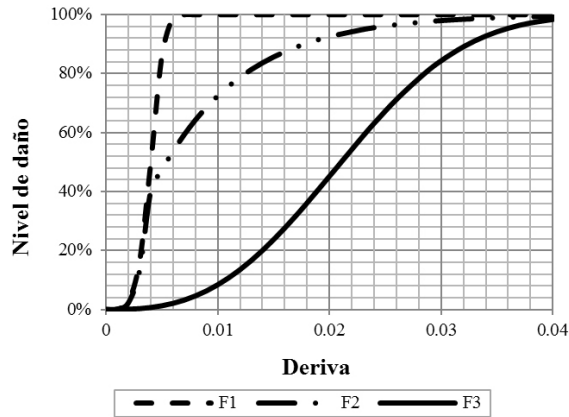


Figura 2. Funciones de vulnerabilidad para estructuras frágiles, medianamente frágiles y dúctiles, indicadas por F1, F2 y F3, respectivamente.

El coeficiente de variación del daño está dado por (6):

$$CV(\text{daño}) = 4 CV(0.5) (E(\text{daño}) - E^2(\text{daño})) \quad (6)$$

En donde $CV(0.5)$ corresponde al coeficiente de variación máximo para un valor del daño del 50%. Para estimar los resultados que se muestran al final de este trabajo se consideró un valor igual a 0.5 para este coeficiente. Este parámetro como otros que definen el modelo utilizado debe precisarse para cada caso.

Por simplicidad, para representar la incertidumbre en el daño se considera una función de densidad de probabilidad *Beta* en el dominio $[0.0, 1.0]$, definida, para cada valor de la deriva, por la Esperanza y la Variancia del daño asociadas a la función de vulnerabilidad.

2.6. Pérdidas sobre una cartera

Para efecto de los resultados que se presentan a continuación, se consideró una equivalencia total y determinista entre el daño de la edificación y la pérdida. Ahora, este no siempre es el caso pues es justamente en este punto de la formulación que se ingresan las características de la póliza para estimar la probabilidad de los diferentes niveles de pérdida de la compañía de seguros dada la probabilidad de los diferentes niveles de daño de la edificación.

Para estimar las pérdidas sobre una cartera formada por un gran número de bienes se calcula la Esperanza de la pérdida total asociada a alguna combinación posible de variables del modelo como la suma de las Esperanzas de las pérdidas de cada uno de los bienes. Para estimar la Variancia de la pérdida total se considera un coeficiente de correlación entre las pérdidas de cada uno de los bienes. Bajo este supuesto, la variancia está dada por (7):

$$Var\left(\sum_i x_i\right) = \sum_i \sum_j \sigma_i \sigma_j \rho_{ij}; \quad \rho_{ij} = 1.0 \text{ si } i = j \quad (7)$$

Donde σ_i representa la desviación estándar de la pérdida del bien i y ρ_{ij} representa el coeficiente de correlación entre las pérdidas de los bienes i y j . Este coeficiente es igual a 1.0 si $i=j$, e igual a ρ en caso contrario.

Finalmente, se asume la misma forma de distribución tipo *Beta* para la pérdida de la cartera completa. Para estimar los resultados que se muestran a continuación se consideró un coeficiente de correlación igual a 0.3 entre las pérdidas de bienes diferentes. Como ya se mencionó, este parámetro como otros que definen el modelo utilizado deben precisarse para cada caso.

3. RESULTADOS

Aunque las tasas de excedencia de pérdidas se pueden ver afectadas por múltiples variables, en este artículo se pretende mostrar la influencia que sobre la estimación de pérdidas tienen: la posición geográfica de los bienes, el estrato de suelo donde las estructuras se emplazan y el tipo de sistema estructural (funciones de vulnerabilidad). Para lograrlo se configuraron carteras ficticias de 10, 30, 60, 90 y 180 edificaciones, las cuales fueron emplazadas en dos ciudades de Colombia: Medellín y Bogotá. Las edificaciones se agrupan de acuerdo a su comportamiento estructural: frágil, medianamente frágil y dúctil, y se les asignan funciones de vulnerabilidad F1, F2 y F3, respectivamente (ver Figura 2). Para la asignación de los periodos estructurales además de tener en cuenta el comportamiento de la estructura, se buscó que los periodos estuvieran distribuidas en el espectro pero concentrados alrededor de los periodos fundamentales de los estratos de suelo: S1, S2 y S3 (Ver Figura 1). En total se configuraron seis posibles escenarios, obteniendo los resultados que

se muestran entre las figuras 3 y 8.

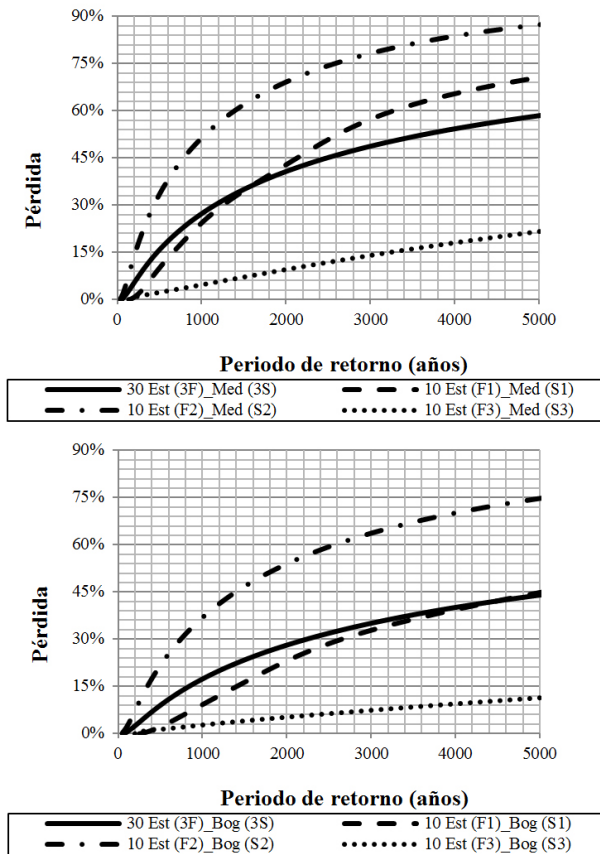


Figura 3. Pérdidas máximas probables extremas en Medellín (arriba) y en Bogotá (abajo). Las líneas punteadas representan las pérdidas en grupos de 10 estructuras con funciones de vulnerabilidad F1, F2 y F3, que se emplazan en estratos de suelo S1, S2 y S3, respectivamente. La línea sólida representa pérdidas conjuntas de las 30 estructuras.

La Figura 3 muestra que las edificaciones más afectadas son las que poseen elementos de mampostería, particularmente edificios de altura mediana con comportamiento medianamente frágil (estructuras de concreto reforzado con muros de mampostería adosada). Los valores de pérdidas máximas conjuntas en la ciudad de Medellín para periodos de retorno bajos (menores a 1000 años) es controlada predominantemente por el daño de los elementos con comportamiento frágil (mampostería); a partir de este punto la curva tiene una tendencia asintótica, la cual puede ser influenciada por las pérdidas en las estructuras de comportamiento dúctil.

Para la ciudad de Bogotá se observan las mismas tendencias, aunque las pérdidas tienen un valor menor, lo cual puede ser explicado por valores de amenaza sísmica más baja.

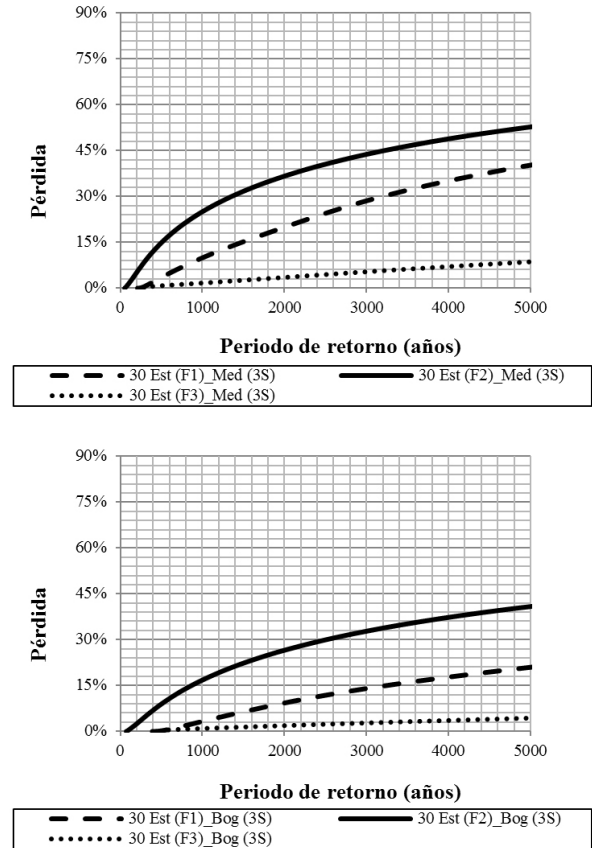


Figura 4. Pérdidas máximas probables para estructuras agrupadas de acuerdo a su sistema estructural, emplazadas de forma que haya uniformidad en los tipos de suelo. Medellín (arriba) Bogotá (abajo). Las curvas representan pérdidas sobre 30 estructuras a las cuales se les asigna una misma función de vulnerabilidad (F1, F2 o F3) y que se emplazan, en grupos de a 10 en suelos S1, S2 y S3.

La Figura 4 confirma lo observado en la Figura 3, con relación al hecho de que las pérdidas son controladas por los edificios de concreto reforzado con muros de mampostería adosada, aún en el caso en que haya una distribución uniforme de los suelos. Ahora, que el valor estimado de las pérdidas sea mucho menor (aproximadamente la mitad) al obtenido en la Figura 3 puede explicar la fuerte influencia que, sobre el valor las pérdidas, tiene el tipo de suelo sobre el que se emplazan las estructuras. Cuando las estructuras se emplazan sobre sectores en los cuales los periodos

fundamentales del estrato se alejan de los periodos de vibración de la edificación, el riesgo se atenúa de forma considerable, contrario a lo que pasaría cuando los periodos de estructura y suelo entraran en resonancia.

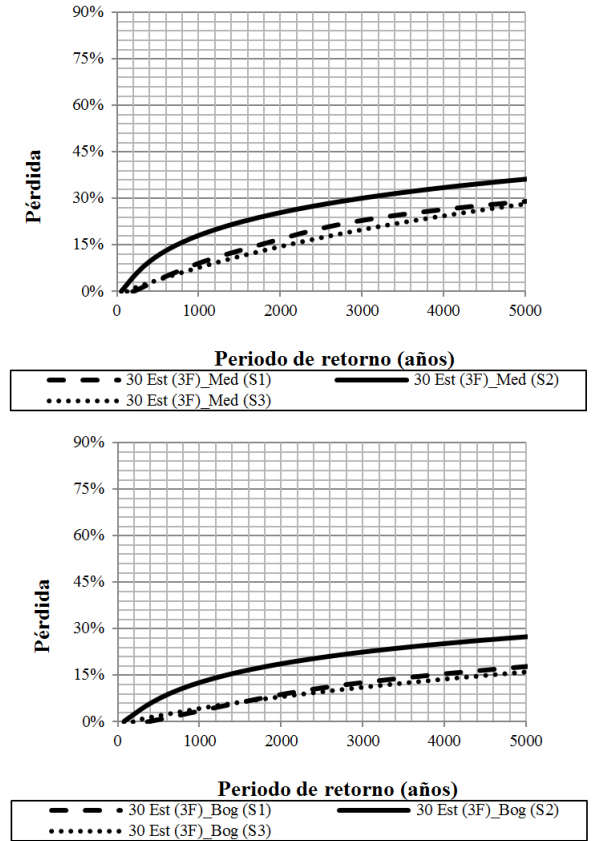


Figura 5. Pérdidas máxima probables sobre estructuras emplazadas en un mismo tipo de suelo, Medellín (arriba), Bogotá (abajo). Las curvas representan las pérdidas sobre 30 estructuras las cuales se emplazan en estratos de suelo S1, S2 o S3. Las estructuras son agrupadas en grupos de a 10 según su comportamiento estructural: frágil, medianamente frágil y dúctil.

La Figura 5 muestra que no hay diferencia notoria entre los valores de pérdida en las 30 estructuras cuando ellas se ubican en los estratos de suelo S1 y S3, con pérdidas controladas por estructuras de comportamiento dúctil. Las mayores pérdidas se presentan cuando las estructuras se encuentran emplazadas en el estrato de suelo S2, resultado que puede verse fuertemente influenciado por la respuesta de las estructuras de comportamiento medianamente frágil cuando ellas se ubican en ese estrato, tal y como se evidencia en la Figura 3.

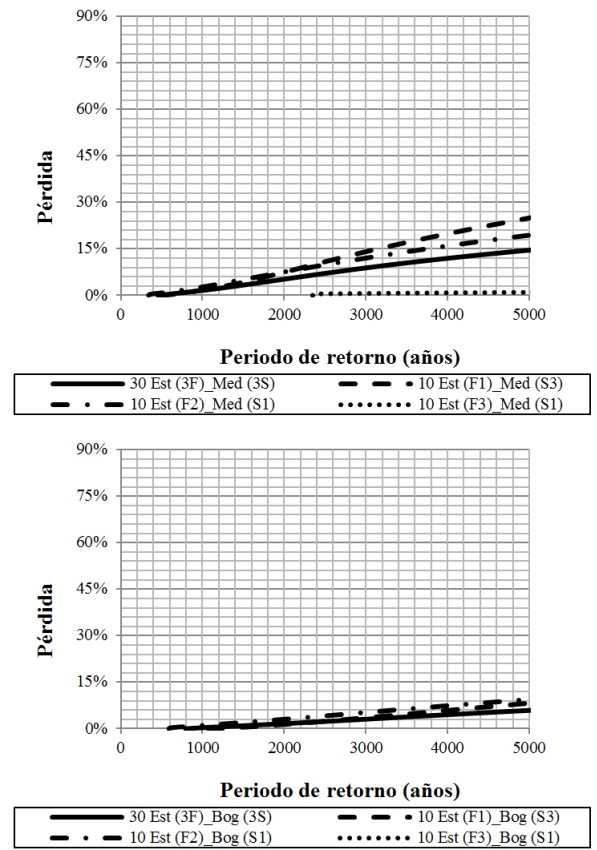


Figura 6. Pérdidas máximas probables mínimas en Medellín (arriba) y en Bogotá (abajo). Las líneas punteadas representan las pérdidas en grupos de 10 estructuras con funciones de vulnerabilidad F1, F2 y F3, que se emplazan en los estratos más favorables: S3, S1 y S1, respectivamente. La línea sólida representa pérdidas conjuntas de las 30 estructuras.

Al comparar los resultados mostrados en la Figura 3 con los de la Figura 6 se constata que efectivamente al realizar modificaciones de los estratos de suelo donde se emplazan las edificaciones, las pérdidas estimadas en todos los niveles se mitigan de manera dramática. En el caso concreto de estructuras dúctiles, cuando se emplazan en el estrato de suelo más favorable (S1), las pérdidas son casi que imperceptibles. En todos los casos se observa un retraso considerable para que en la cartera se empiecen a registrar pérdidas. Igualmente, se aprecia que los efectos en el valor de la pérdida de los elementos de mampostería no son dominantes.

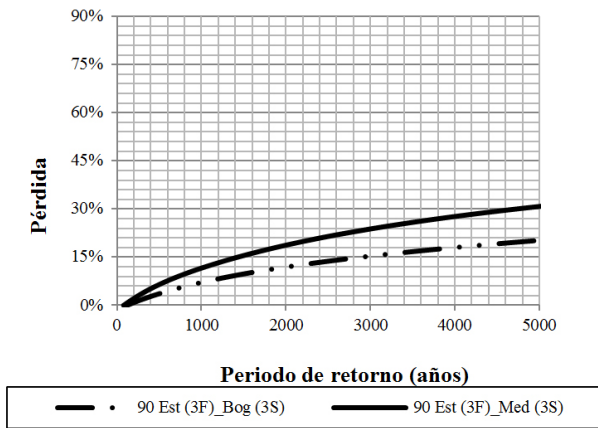


Figura 7. Pérdidas máximas probables conjuntas sobre estructuras emplazadas en Medellín (línea sólida) o en Bogotá (línea punteada). Las curvas representan las pérdidas conjuntas cuando hay uniformidad tanto en el comportamiento estructural como en el tipo de suelo.

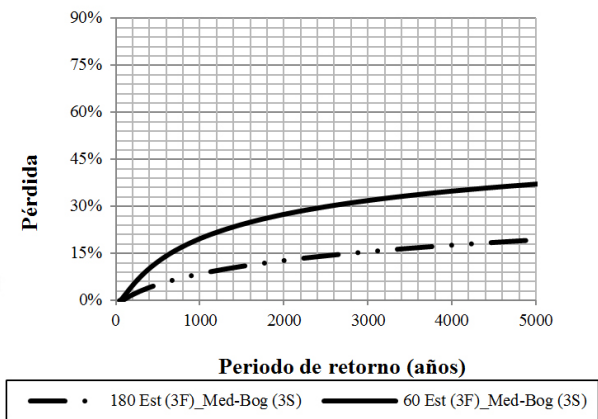


Figura 8. Pérdidas máxima probable conjunta sobre estructuras ubicadas en Medellín y Bogotá simultáneamente. La línea punteada representa las pérdidas conjuntas cuando hay uniformidad tanto en el comportamiento estructural como en el tipo de suelo. La línea sólida representa las pérdidas conjuntas extremas, y resulta de analizar una cartera de 60 estructuras (las 30 estructuras analizadas para obtener los resultados expuestos en la Figura 3).

Las pérdidas conjuntas en las dos ciudades es un valor que depende de la proximidad y con ésta de la posibilidad de que un evento dañe al mismo tiempo las dos ciudades. Si las dos ciudades están tan cerca que puedan tratarse como una sola ciudad, y por lo tanto con la misma amenaza, los porcentajes de pérdidas de cada ciudad serán iguales, e igual al de

las dos ciudades tratadas conjuntamente. Si por el contrario, las dos ciudades están tan alejadas que no existe posibilidad de que un mismo evento dañe las dos ciudades, pero independientemente tienen la misma amenaza, el porcentaje de pérdidas de cada ciudad tratada independientemente será el mismo, pero el porcentaje de pérdidas de las dos ciudades consideradas conjuntamente y asociado a determinado periodo de retorno será igual a la mitad del porcentaje de pérdidas de cada ciudad tratada independientemente pero asociado a un periodo de retorno del doble de tiempo. Este último parece ser justamente el caso, pues el porcentaje de pérdidas asociadas a un periodo de retorno de 1000 años de las dos ciudades consideradas conjuntamente es semejante a la mitad del porcentaje de pérdidas de una sola de las ciudades, pero asociado a un periodo de retorno de 2000 años.

Finalmente, es importante recordar que los resultados que se presentan son función de las formas funcionales adoptadas para las distribuciones de probabilidad de las diferentes variables aleatorias, así como de los parámetros que definen estas funciones.

4. CONCLUSIONES

La evaluación del riesgo sísmico en estructuras es un problema que involucra un número importante de variables sobre las cuales aún no conocemos su comportamiento físico con certeza. Sin embargo, y a pesar de lo complejo del fenómeno sísmico, es posible, mediante una formulación probabilista que considere de manera racional las incertidumbres involucradas, obtener una estimación de las tasas de excedencia de pérdidas, o al menos obtener unas tendencias características.

Aunque las pérdidas en una cartera determinada está gobernada por un gran número de variables, en este trabajo se mostró la sensibilidad sobre: tipos de suelo, funciones de vulnerabilidad y distribución espacial de los bienes, con resultados que nos indican que pueden existir grandes diferencias de acuerdo a la composición de la cartera y la ubicación de las edificaciones. Tener sensibilidad sobre la influencia de estos parámetros puede ayudar a mejorar la planeación de los entes urbanos, pues permitiría tener una distribución más racional de las edificaciones con miras a reducir el riesgo por terremoto. Igualmente, permitiría a las

entidades aseguradoras tener mayores elementos de juicio para lograr una mejor distribución de sus bienes asegurados.

AGRADECIMIENTOS

Se quiere dar los agradecimientos a las instituciones: UNIVERSIDAD EAFIT, Grupo de Investigación de Mecánica Aplicada, a la empresa INTEGRAL, S.A - Ingenieros Consultores y a COLCIENCIAS. Igualmente a los ingenieros Luis F. Restrepo Vélez (SOLINGRAL), Andrés F. Vélez Rodríguez (INTEGRAL, S.A) y a los compañeros: Juan Camilo Molina V., por sus valiosos aportes, y a Jorge Leandro Medina B. por su incansable apoyo y complemento en la programación.

REFERENCIAS

- [1] CAPRA, Disaster risk information platform, Available: www.ecapra.org
- [2] Federal Emergency Management Agency, FEMA. Multi-hazard loss estimation methodology: Earthquake model - HAZUS MH. Washington DC : US, 2002
- [3] Youngs, R. and Coppersmith, J., Implications of Fault Slip Rates and Earthquake Recurrence Models to Probabilistic Seismic Hazard Estimates. Bulletin of the Seismological Society of America, volume. 75, No. 4, pp. 939-964, August 1985.
- [4] Gallego, M., Estimación del Riesgo Sísmico en la República de Colombia, [MSc Tesis]. México D.F, Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de México, 2000.
- [5] Bommer, J. J. and Crowley, H., The Influence of Ground-Motion Variability in Earthquake Loss Modelling. Bulletin of Earthquake Engineering, volume 4, pp. 231-248, April 2006.
- [6] Bommer, J.J. and Crowley, H., Modelling Seismic Hazard in Earthquake Loss Models with Spatially Distributed Exposure. Bulletin of Earthquake Engineering, volume 4, pp. 249-273, March 2006.
- [7] Restrepo, L. F. and Bommer, J.J., An Exploration of the Nature of the Scatter in Ground-Motion Prediction Equations and the Implications for Seismic Hazard Assessment. Journal of Earthquake Engineering, volume 7, special issue No. 1, pp. 171-199, 2003.
- [8] Jaramillo, F., Influence of the Uncertainty in the Soil-Rock Spectral Ratios in the Definition of Uniform Hazard Spectra at Surface Level. Journal of Earthquake Engineering, volume 10, No. 3, pp. 1-6, 2006.
- [9] Miranda, E., Inelastic Displacement Ratios for Structures on Firm Sites. Journal of Structural Engineering, volume 126, No. 10, pp. 1150 – 1159, April 1999.
- [10] Miranda, E., Approximate Seismic Lateral Deformation Demands in Multistory Buildings. Journal of Structural Engineering, volume 125, No. 4, pp. 417- 425, April 1999.
- [11] Maldonado, E., Gómez, I., Chio Cho, G., Funciones de vulnerabilidad y matrices de probabilidad de daño sísmico para edificaciones de mampostería utilizando técnicas de simulación. Dyna, Vol. 75, Núm. 155, pp. 63-76, julio, 2008.
- [12] AREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ. Microzonificación y evaluación del riesgo sísmico del Valle de Aburra. Medellín, Diciembre de 2007.
- [13] Jaramillo, J. D. y Estrada, G., Evaluación del Riesgo Sísmico con Fines de Seguros. II Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Medellín, Universidad de Medellín, Medellín, Noviembre de 2003.