

Comparación de los resultados de riesgo sísmico en dos ciudades con los mismos coeficientes de diseño sismo resistente

Comparison of the Seismic Risk Results in Two Cities with the Same Earthquake Resistant Design Coefficients

Mario Andrés Salgado-Gálvez ^{(1)*}, Daniela Zuloaga Romero ⁽²⁾, Gabriel Andrés Bernal Granados ^{(3)*}, Omar Darío Cardona Arboleda ⁽⁴⁾

^{(1)*} Ph.D. (e) en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural. mario.sal.gal@gmail.com

⁽²⁾ M.Sc. en Ingeniería Estructural. Illinois Institute of Technology. Illinois, Estados Unidos. dzuloaga@hawk.iit.edu

^{(3)*} Ph.D. en Análisis Estructural. gabernal@cimne.upc.edu

⁽⁴⁾ Ph.D. en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural. Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia. Sede Manizales, Colombia. odcardonaa@unal.edu.co

* Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.

Recibido 21 de marzo de 2014. Modificado 20 de noviembre de 2014. Aprobado 25 de noviembre de 2014.

DOI: <http://dx.doi.org/10.16924/riua.v0i41.384>

Palabras clave

Análisis probabilista de riesgo sísmico, amenaza sísmica, vulnerabilidad sísmica.

Resumen

De acuerdo al Reglamento NSR-10 las ciudades de Bogotá y Medellín tienen los mismos coeficientes de diseño A_a y A_v que, desde una primera lectura, indicarán el mismo nivel de amenaza sísmica. Sin embargo, la selección del período de retorno para diseño sismo resistente corresponde a una decisión arbitraria y valores iguales de amenaza en ambas ciudades corresponden a una mera coincidencia, dado que, la amenaza sísmica en cada caso se ve influenciada por entornos sismo-tectónicos totalmente diferentes. La comparación de los resultados de riesgo sísmico, desde el punto de vista físico, de ambas ciudades, permite identificar la influencia de las fuentes sismogénicas, los efectos de sitio y la vulnerabilidad física en dichos análisis.

Key words

Probabilistic seismic risk assessment, seismic hazard, seismic vulnerability.

Abstract

According to the national building code NSR-10, the cities of Bogotá and Medellín have the same seismic design coefficients A_a and A_v that, in a first approach, would indicate the same seismic hazard level. However, the selection of the design return period corresponds to an arbitrary decision and equal hazard values for these two cities are just a mere coincidence because seismicity in each case is influenced by completely different seismo-tectonic environments. The comparison of the seismic risk results from a physical perspective allows identifying the influence of seismogenetic sources, local site effects and physical vulnerability in said analysis.

INTRODUCCIÓN

El Reglamento NSR-10 (Decreto 926 de 2010) establece que los coeficientes de diseño sísmico tienen asociado una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años de vida útil, lo que aproximadamente corresponde a 475 años de período de retorno. De acuerdo al mismo Reglamento, los coeficientes sísmicos de diseño para Bogotá D.C. y Medellín, A_a

y A_v , que dan cuenta de la amenaza sísmica en roca, tienen el mismo valor y han sido fijados en 0.15 y 0.20g respectivamente. Lo anterior debe ser entendido como una mera coincidencia asociada a la selección arbitraria del período de retorno para dichos coeficientes, dado que la amenaza sísmica en ambas ciudades, está influenciada por entornos sismo-tectónicos diferentes que, para períodos de retorno diferentes

al establecido con fines de diseño de edificaciones, presentan diferencias relativas en los valores de la amenaza sísmica.

Por otra parte, la cuantificación del riesgo sísmico mediante metodologías probabilistas, (Ordaz, 2000; Grossi y Kunreuther, 2005) permite la obtención de los resultados en términos de la curva de excedencia de pérdidas y otras métricas como la pérdida anual esperada (PAE) y la pérdida máxima probable (PML). Al comparar los resultados de riesgo sísmico para ambas ciudades, utilizando exactamente la misma metodología en cada caso, existen diferencias importantes en la PAE y la PML. En el presente artículo se realiza una comparación de los diferentes aspectos que influencian el riesgo y permiten explicar la diferencia entre los resultados.

El hecho de tener, en principio, un mismo nivel de amenaza sísmica en roca, cuantificado a partir de unos coeficientes, puede llevar a pensar de manera errónea que los niveles de riesgo sísmico en las dos ciudades son similares si no iguales. Sin embargo, una evaluación cuidadosa en las diferencias de los factores relacionados con la frecuencia de ocurrencia de eventos sísmicos, los efectos de sitio que dan cuenta de la respuesta dinámica del suelo y la vulnerabilidad física de los elementos expuestos permiten un entendimiento del por qué estos valores difieren y por qué la filosofía de diseño debe enfocarse hacia la perspectiva del riesgo.

COMPARACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA

La evaluación de la amenaza sísmica en roca a nivel nacional ha derivado en la determinación de los coeficientes A_a y A_v incluidos en el Reglamento NSR-10. Para las ciudades de Bogotá y Medellín los coeficientes sísmicos A_a y A_v tienen el mismo valor de 0.15 y 0.20g respectivamente. Esto crea la idea de que ambas ciudades tienen el mismo nivel de amenaza sísmica. Adicionalmente, de acuerdo a dicha clasificación, ambas ciudades están catalogadas como de amenaza sísmica intermedia. Sin embargo, una mirada

cuidadosa en la estimación y resultados de esta (Comité AIS-300, 2010; Salgado-Gálvez, 2010; Salgado-Gálvez, Bernal, Yamín y Cardona, 2010) permiten concluir que lo anterior no es más que una mera coincidencia, dado que, al estar ambas ciudades localizadas en zonas con diferentes entornos sismotectónicos, los valores de amenaza difieren para períodos de retorno diferentes al de diseño (475 años). Lo anterior se presenta de manera gráfica en la Figura 1, en la cual, para tres diferentes períodos de retorno se comparan los valores de amenaza sísmica de las dos ciudades a partir de los espectros de amenaza uniforme (EAU). En dichos espectros, cada ordenada espectral tiene siempre asociado el mismo período de retorno.

Si adicionalmente se revisa la participación de las fuentes sismogénicas en el valor de la amenaza total, tal y como se presenta en la Figura 2, es posible observar que para las dos ciudades en cuestión, la aceleración máxima del terreno (PGA) no está asociada a fuentes sismogénicas comunes. Esto se debe a variaciones importantes en los parámetros de

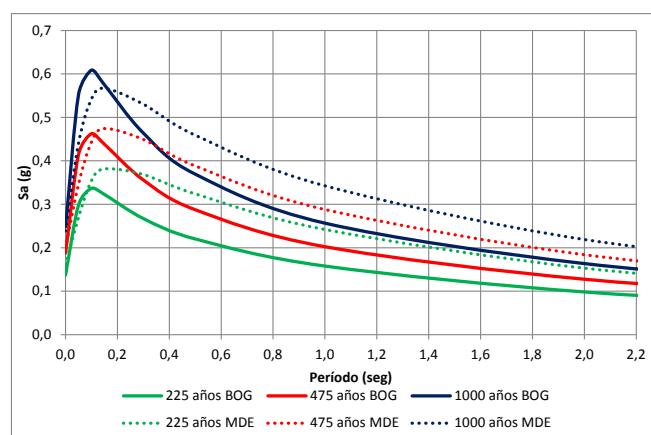


Figura 1. Espectros de amenaza uniforme para diferentes períodos de retorno en Bogotá y Medellín

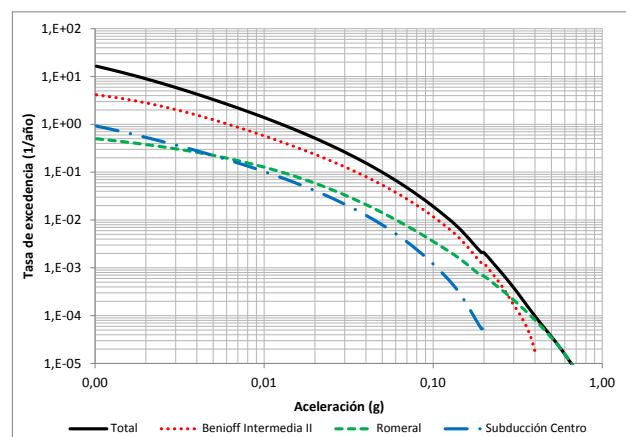
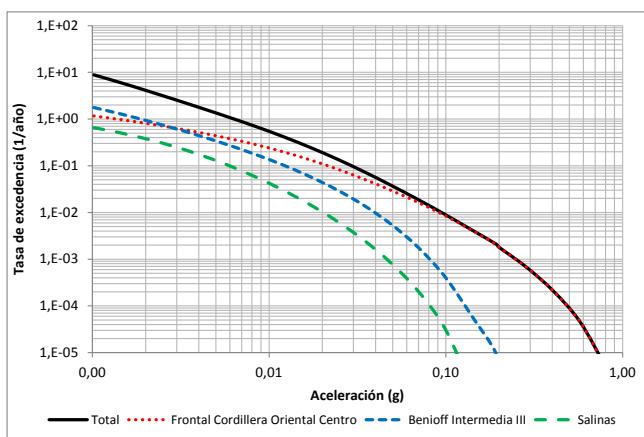


Figura 2. Participación de las fuentes sismogénicas en la amenaza sísmica total para Bogotá (izquierda) y Medellín (derecha)

sismicidad de las fuentes sismogénicas en cuestión (Comité AIS-300, 2010) y se refleja en las diferencias de la amenaza sísmica para otros períodos de retorno diferentes al de diseño, tales como los presentados en la Figura 1.

A partir de lo anterior, resulta evidente que, para Bogotá, la amenaza sísmica está controlada por la fuente *Frontal Cordillera Oriental Centro* mientras que, para Medellín, está controlada por la *Zona de Benioff Intermedia Centro*. Con base en los parámetros de sismicidad de dichas fuentes es posible realizar la comparación de las curvas de recurrencia de magnitudes (Cornell, 1968) tal y como se presenta en la Figura 3. Estas curvas relacionan la frecuencia media de ocurrencia de sismos con las magnitudes esperadas para cualquier zona dentro del área que define la fuente sismogénica. Para la presente comparación, hay mayor actividad sísmica asociada a la fuente que controla la amenaza en Medellín pero también debe tenerse en cuenta que el área total de esta es mayor si se compara con la de la *Frontal Cordillera Oriental Centro* (Comité AIS-300, 2010) y de ahí que, no se deba esperar un aumento proporcional en los niveles de amenaza sísmica. Por último, es importante destacar que se han seleccionado estas dos fuentes para la comparación por ser las que controlan la amenaza sísmica en cada ciudad para los períodos de retorno de interés; sin embargo, la integración probabilista de la amenaza considera la participación de todas las fuentes sismogénicas incluidas en la evaluación sin que esto quiera significar la ocurrencia simultánea de terremotos.

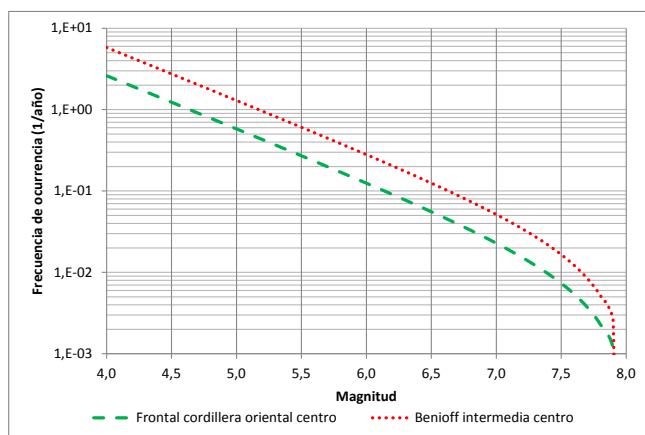


Figura 3. Comparación de las curvas de recurrencia de magnitudes para las fuentes de mayor contribución en la amenaza sísmica de Bogotá y Medellín

La forma funcional de los espectros elásticos de diseño del Reglamento NSR-10 depende, desde el punto de vista de la amenaza sísmica, de dos coeficientes cuyo período de retorno como se ha mencionado anteriormente, se ha fijado en aproximadamente 475 años. Estos coeficientes, denotados como A_a y A_v están asociados únicamente a dos ordenadas espectrales, 0.0 y 1.0 segundos respectivamente. Adicionalmente, estos han sido redondeados al 0.05g más

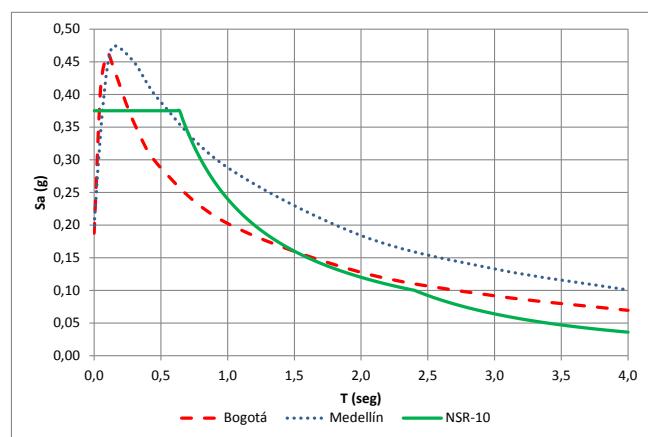


Figura 4. Comparación de EAU con el espectro elástico de diseño en roca para Bogotá y Medellín

cercano antes de su inclusión en el Reglamento. La Figura 4 presenta la comparación de los EAU en roca de ambas ciudades y el espectro elástico de diseño (usando un suelo tipo B). Este último, al estar asociado a coeficientes A_a y A_v con el mismo valor, es el mismo para ambas ciudades.

Los períodos de retorno asociados a las ordenadas del espectro elástico de diseño varían de punto a punto y solo se pueden considerar iguales a 475 años en las dos ordenadas anteriormente mencionadas. Debido a esto, resulta incorrecto hablar de la existencia de un nivel de amenaza sísmica uniforme en el proceso de diseño y construcción de edificaciones en el territorio colombiano.

Adicionalmente, Bogotá y Medellín cuentan con estudios de microzonificación sísmica (CEDERI, 2006; SIMPAD, Universidad EAFIT, Integral, Ingeominas y Universidad Nacional de Colombia, 1999) que dan cuenta de la respuesta dinámica del suelo. Las características de los depósitos de suelo en ambas ciudades son bastante diferentes y ello conlleva a diferencias importantes en los niveles de amenaza sísmica en superficie para cada ordenada espectral. Dado que las estructuras responden de manera diferente a las solicitudes sísmicas de acuerdo a sus características estructurales, es necesario contar con una cuantificación espectral de la amenaza sísmica para una evaluación integral del riesgo sísmico. La respuesta dinámica del suelo puede considerarse tanto en la evaluación de la amenaza como del riesgo sísmico mediante funciones de transferencia espectrales definidas para cada zona homogénea de suelo a partir de los estudios de microzonificación (Zuloaga, 2011; Salgado-Gálvez, Zuloaga y Cardona, 2013; Salgado-Gálvez, Zuloaga, Bernal, Mora y Cardona, 2014) y su consideración resulta fundamental en las evaluaciones urbanas.

A manera de ejemplo, usando un conjunto de funciones de transferencia espectrales en el programa de cálculo CRISIS 2014 (Ordaz et al., 2014) se obtienen los resultados de amenaza sísmica en superficie en términos de PGA tal y como se muestra en la Figura 5, en donde es evidente que, dada la

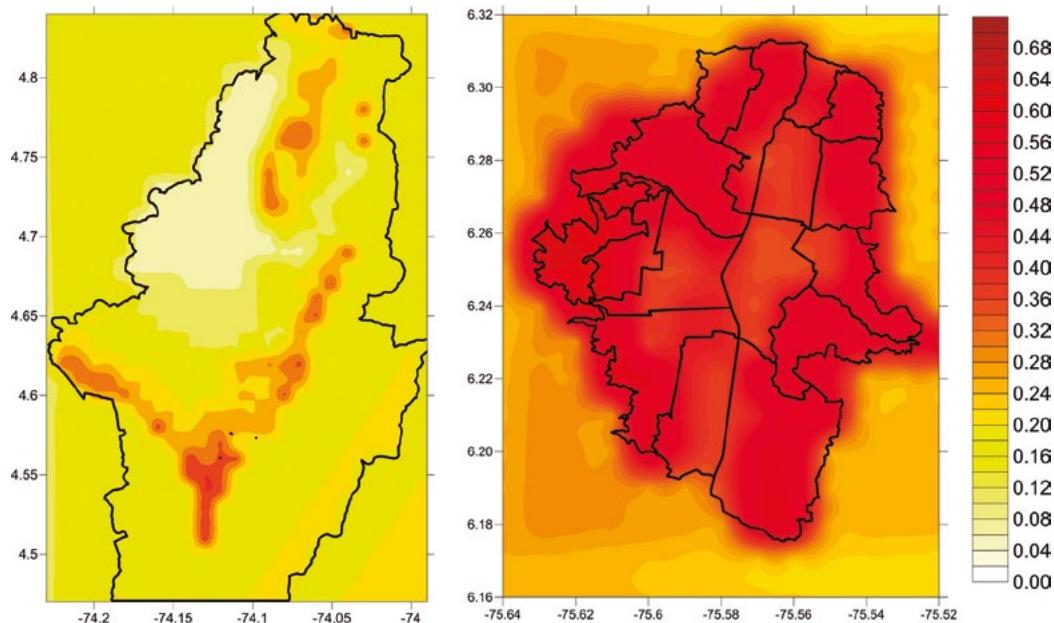


Figura 5. Mapas de amenaza sísmica en superficie de Bogotá y Medellín. PGA, 475 años (g)

presencia de suelos blandos en Bogotá, se tienen valores menores de amenaza sísmica que en Medellín; ocurre lo contrario si el mismo cálculo se realiza para períodos de vibración superiores a 1.5 segundos.

ELEMENTOS EXPUESTOS Y VULNERABILIDAD SÍSMICA

El número de edificaciones en Bogotá supera los 860,000 elementos mientras que en Medellín está del orden de 240,000. A pesar de dicha diferencia, que evidentemente se refleja en el valor total expuesto, el riesgo sísmico de ambas ciudades puede compararse a través de los valores relativos de métricas como la PAE y la PML. En términos generales, se puede considerar que las características generales de las edificaciones de ambas ciudades son similares, ya sea desde el punto de vista de distribución porcentual de sistemas estructurales como de la vulnerabilidad sísmica de estos. En ambas ciudades la mayoría de las construcciones consisten en elementos de diferentes tipos de mampostería (simple, confinada, reforzada) con alturas entre 1 y 3 pisos, seguido de otros sistemas estructurales como pórticos en concreto reforzado y pórticos en acero para mayores alturas así como de estructuras de tierra (adobe y tapia) en las zonas históricas. Para mayores detalles sobre la distribución y características de los sistemas estructurales se pueden consultar los estudios de Zuloaga (2011), Salgado-Gálvez et al. (2013) y Salgado-Gálvez et al. (2014).

Así mismo, se puede suponer el mismo nivel de cumplimiento de los reglamentos de construcción sismo resistente a lo largo del tiempo y seguimiento de prácticas constructivas similares. Con esto se puede ver que, para ambas ciudades,

las características estructurales no derivan en diferencias importantes en el comportamiento esperado de las edificaciones ante solicitudes sísmicas. En ambos casos se ha utilizado un enfoque de funciones de vulnerabilidad que permite una representación cuantitativa, continua y probabilista de los niveles de daño medio esperados para cada clase estructural identificada. Para mayores detalles sobre las funciones de vulnerabilidad utilizadas para los análisis de riesgo sísmico se pueden consultar los estudios de Zuloaga (2011), Salgado-Gálvez et al. (2013) y Salgado-Gálvez et al. (2014).

ANÁLISIS PROBABILISTA DE RIESGO SÍSMICO

En los dos casos se ha seguido la misma metodología de evaluación probabilista de riesgo sísmico propuesta por Ordaz (2000) y se ha utilizado la herramienta de cálculo CAPRA-GIS (ERN-AL, 2011). La información sobre la amenaza sísmica en roca es común a ambas ciudades y corresponde a la utilizada en el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (Comité AIS-300, 2010). Para los otros insumos que se requieren en tales evaluaciones como los efectos de sitio, los elementos expuestos y la vulnerabilidad, se utilizó también un enfoque común en ambas evaluaciones. Para los primeros se tiene la definición de funciones de transferencia espectral para cada zona homogénea de suelo identificada; para los segundos, bases de datos con nivel de resolución predio a predio; y para los últimos, un enfoque probabilista a partir de funciones de vulnerabilidad para cada clase estructural identificada. El presente análisis se ha realizado de manera conjunta para las edificaciones públicas y privadas de ambas ciudades; este mismo tipo de análisis, con algunas modificaciones metodológicas, también puede realizarse de

manera probabilista para edificaciones de manera individual (Bazzurro y Luco, 2005).

El resultado principal del análisis de riesgo sísmico es la curva de excedencia de pérdidas (LEC) que relaciona diferentes valores de pérdida con las tasas anuales de excedencia. Una vez se cuenta con dicha información es posible derivar resultados como la PAE y la PML. La curva de excedencia de pérdidas se calcula mediante la Ecuación 1.

$$v(p) = \sum_{i=1}^N \Pr(P>p | Evento_i) \cdot F_A(Evento_i) \quad (1)$$

donde $v(p)$ es la tasa de excedencia de la pérdida, $\Pr(P>p | Evento_i)$ es la probabilidad de excedencia de la pérdida condicionada a la ocurrencia del evento i y $F_A(Evento_i)$ es la frecuencia anual de ocurrencia del evento i . Resulta importante destacar que la representación de la amenaza para este tipo de análisis debe realizarse mediante un conjunto de escenarios estocásticos que, bajo la suposición de un proceso de Poisson para la estimación de pérdidas, debe cumplir con las suposiciones de ser mutuamente excluyente y colectivamente exhaustivo. Los escenarios se generan a partir de las recursivas subdivisiones en geometrías simples de las fuentes sismogénicas incluidas en el modelo de amenaza sísmica y son compatibles con los parámetros de sismicidad asociados a cada una de ellas.

Es importante notar que el período de retorno de la pérdida es simplemente el inverso de la frecuencia anual de excedencia y bajo ninguna circunstancia corresponde a un tiempo exacto para que estas vuelvan a ocurrir. Adicionalmente, dado que existe correlación entre las pérdidas (Salgado-Gálvez et al. 2014) y estas han sido consideradas en el análisis, el período de retorno de la pérdida no necesariamente corresponde al período de retorno del escenario sísmico.

Dado que el análisis se realiza sobre cada elemento y que, como se mencionó en ambos casos, se cuenta con información geo-referenciada predio a predio (Zuloaga, 2011; Salgado-Gálvez et al., 2014), el análisis permite realizar de manera rigurosa la convolución entre la amenaza y la vulnerabilidad. Lo anterior resulta importante cuando, por ejemplo, se tiene un conjunto de viviendas de baja altura localizadas sobre un suelo blando cuyo período fundamental de vibración es sustancialmente mayor que el de ellas. Esto en superficie se refleja en un nivel de intensidad menor al que estarían las mismas viviendas si estuviesen localizadas en un suelo con período fundamental similar al de ellas y es precisamente con dicho valor de intensidad en superficie que se hace la estimación del nivel esperado de daño.

Es importante resaltar que los análisis probabilistas de riesgo sísmico han despertado interés dado que constituyen herramientas que pueden incorporarse en esquemas de gestión del riesgo de desastres en diferentes ámbitos ya sea desde el

enfoque de planeación y manejo de la emergencia, como de planificación financiera, retención y transferencia del riesgo y salvaguarda de infraestructura crítica y desarrollo económico de una ciudad, región o país.

COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE RIESGO SÍSMICO

La Tabla 1 presenta la comparación de los resultados de riesgo sísmico para ambas ciudades (Zuloaga, 2011; Salgado-Gálvez et al., 2014) en términos relativos al valor total expuesto.

Existe una diferencia importante entre la PAE relativa de ambas ciudades donde la de Medellín supera en el orden del 60% a la de Bogotá. Esta métrica da cuenta de las pérdidas generadas tanto por los eventos pequeños, moderados y severos, por lo que constituye un indicador robusto si se quieren comparar los niveles de riesgo. La PAE se calcula a partir de la Ecuación 2.

Ciudad	Bogotá	Medellín
PAE %	2.516	4.124
Período de retorno	PML	
años	%	%
100	6.02	6.84
250	9.59	10.72
500	12.58	13.88
1000	15.92	17.00

Tabla 1: Comparación de resultados de riesgo sísmico relativos de Bogotá y Medellín

$$PAE = \sum_{i=1}^N E(P | Evento_i) \cdot F_A(Evento_i) \quad (2)$$

donde $E(P | Evento_i)$ es el valor esperado de la pérdida en cada elemento expuesto dada la ocurrencia del evento i y $F_A(Evento_i)$ es la frecuencia anual de ocurrencia del evento i que actúa como un factor de ponderación. Cabe aclarar que aquí se está entendiendo que la frecuencia de ocurrencia está asociada directamente con las fuentes sismogénicas y que estas, teniendo asignados diferentes parámetros de sismicidad, contribuyen en los resultados finales de riesgo. Además, la PAE puede utilizarse como un punto de partida para el establecimiento de la prima en un esquema de aseguramiento. Lo anterior indica que edificios con exactamente las mismas características estructurales

localizados en Bogotá y en Medellín están con diferentes niveles de riesgo a pesar de, en principio, tener el mismo nivel de amenaza y vulnerabilidad sísmica.

Por otro lado, las PML para los cuatro períodos de retorno seleccionados pueden considerarse del mismo orden de magnitud siendo también en todos los casos mayores en Medellín, aunque en menor proporción que en el de la variación de la PAE. Del conjunto de más de 20,000 escenarios que representan de manera integral la amenaza sísmica en Colombia, 1,861 tienen aceleraciones de PGA superiores a 5 cm/s^2 en Medellín mientras que 1,261 las tienen en Bogotá. Casi todos los 600 escenarios de diferencia generan aceleraciones bajas a moderadas en Medellín y, en consecuencia generan daños de baja cuantía que, en conjunto, incrementan significativamente la PAE de Medellín. Las PML por su parte, al estar asociadas a eventos de baja frecuencia, es decir, períodos de retorno largos, no son sensibles a la ocurrencia de eventos de pérdida de baja cuantía, por lo cual, para ambas ciudades tienen valores cercanos; lo cual indica también las similitudes en la vulnerabilidad sísmica de ambas ciudades.

CONCLUSIONES

La existencia de coeficientes sísmicos de diseño iguales para dos ciudades no debe interpretarse como la existencia de un mismo nivel de amenaza y riesgo sísmico en ellas. Se ha presentado la comparación desde el punto de vista de la contribución de la amenaza sísmica por fuente, las diferencias en los parámetros de sismicidad asignados a las fuentes sismogénicas que controlan la amenaza sísmica en los períodos de retorno de interés en Bogotá y Medellín y las implicaciones que esto tiene desde el punto de vista del riesgo sísmico. Adicionalmente, contar con un nivel similar de amenaza sísmica en roca además de un conjunto de elementos expuestos con características parecidas, no necesariamente indica un nivel de riesgo sísmico similar cuando se consideran los efectos de sitio. Los estudios de microzonificación existentes en ambas ciudades pueden considerarse como recientes si se comparan con los inicios de los procesos de desarrollo y planeación urbana. Por eso, también puede considerarse como una afortunada coincidencia que viviendas de alta vulnerabilidad sísmica, como las existentes en el sur de Bogotá o en el centro de Medellín, construidas principalmente en mampostería y con baja altura, se encuentren sobre suelos blandos que incluso llegan a filtrar el movimiento sísmico. Esto se ve reflejado en valores de intensidad en superficie más bajos que los estimados en roca y, lleva también a niveles menores de riesgo (ver Figura 5).

Es interesante ver que el riesgo sísmico ha sido entendido recientemente como un problema de desarrollo y este tipo de evaluaciones constituyen avances importantes en la primera etapa de un esquema integral de la gestión del riesgo (Cardona, 2009). Dadas las implicaciones que la utilización e incorporación de estos resultados pueda tener en la definición

de esquemas de retención y transferencia del riesgo, ya sea mediante instrumentos tradicionales de seguro y reaseguro o mediante instrumentos alternativos como créditos contingentes, bonos catastróficos o cautivas (Marulanda, Cardona, Ordaz y Barbat, 2008), es importante contar con una descripción de todos los elementos que pueden llegar a modificar sustancialmente el resultado final. En este trabajo se ha comparado el riesgo sísmico de dos ciudades que, en principio, podrían entenderse con el mismo nivel de amenaza sísmica en roca y con un conjunto de elementos expuestos con características básicas. Sin embargo, la revisión cuidadosa de los efectos de sitio y el estudio de las diferentes fuentes sismogénicas que contribuyen en el valor de la amenaza sísmica integrada, considerando sus geometrías y las frecuencias anuales de ocurrencia de eventos de diferentes magnitudes, muestra que los resultados en términos de riesgo físico tienen diferencias importantes en términos de la PAE aunque no tanto en términos de PML.

Así mismo, fijar de manera arbitraria períodos de retorno para los coeficientes de diseño sismo resistente ha sido una medida de gran utilidad en el desarrollo de los reglamentos no solo a nivel colombiano sino a nivel nacional, sin embargo, como se presentó anteriormente, esto no implica la existencia de un nivel de amenaza uniforme a lo largo de todo el rango de ordenadas espectrales de interés. Dado que hoy en día se cuenta con herramientas para estimaciones confiables de la amenaza y el riesgo sísmico, además de un mejor entendimiento conceptual y metodológico de dichos cálculos, es recomendable empezar un proceso de cambio de filosofía orientado hacia el diseño basado en el riesgo como, por ejemplo, basado en probabilidades de colapso estructural y no únicamente en la determinación de niveles de amenaza mediante coeficientes. Lo anterior permitiría un enfoque integral de la gestión del riesgo desde el punto de la identificación y reducción de este, así como en la posibilidad de la implementación de esquemas más transparentes de retención y transferencia del mismo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Educación y Ciencia de España por el apoyo en el marco del proyecto “Enfoque integral y probabilista para la evaluación del riesgo sísmico en España” – CoPASRE (CGL2011-29063), así como al Ministerio de Economía y Competitividad de España en el marco del programa FPI. De igual manera, los comentarios de tres revisores anónimos que han enriquecido de manera sustancial la primera versión del artículo.

REFERENCIAS

- Bazzurro, P. y Luco, N. (2005). *Accounting for uncertainty and correlation in Earthquake loss estimation*. Ponencia presentada en la 9º International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR). Roma, Italia.

- Cardona, O.D. (2009). *La gestión financiera del riesgo de desastre. Instrumentos financieros de retención y transferencia para la Comunidad Andina*. PREDECAN. Lima, Perú.
- Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos (CEDERI). (2006). *Actualización de la microzonificación sísmica de la Ciudad de Bogotá*. Bogotá D.C. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental , Universidad de Los Andes.
- Comité AIS-300. (2010). (AIS). (2010). *Estudio General de la Amenaza Sísmica de Colombia*. Bogotá D.C: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- Cornell, A.C. (1968). Engineering Seismic Risk Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(5), 1583-1606.
- Decreto 926 de 2010 por medio del cual se adopta el Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes NSR-10. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Evaluación de Riesgos Naturales – América Latina (ERN-AL). (2011). CAPRA-GIS v2.0, [Programa para la evaluación probabilista de riesgos naturales]. Recuperado de: www.ecapra.org/capra-gis
- Grossi, P. y Kunreuther H. (2005). Catastrophe modelling: A new approach to managing risk. Springer Science.
- Marulanda M.C., Cardona O.D., Ordaz M.G., Barbat A.H. (2008). La gestión financiera del riesgo desde la perspectiva de los desastres. Monografías de Ingeniería Sísmica. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, España.
- Ordaz, M. (2000). *Metodología para la evaluación del riesgo sísmico enfocada a la gerencia de seguros por terremoto*. México D.F. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ordaz, M., Martinelli, F., Aguilar, A., Arboleda, J., Meletti, C. & D'Amico, V. (2014). CRISIS2014 V1.1. [Programa para la evaluación de la amenaza sísmica]. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F., México.
- Salgado-Gálvez, M.A. (2010). *Evaluación probabilista y espectral de la amenaza sísmica de Colombia: estudio general con fines de diseño sismo resistente*. (Tesis inédita de maestría). Universidad de Los Andes, Bogotá D.C., Colombia.
- Salgado-Gálvez, M.A., Bernal, G.A., Yamin, L.E. & Cardona, O.D. (2010). Evaluación de la amenaza sísmica de Colombia. Actualización y uso en las nuevas normas colombianas de diseño sismo resistente NSR-10. *Revista de Ingeniería Universidad de Los Andes*, (32), 28-37.
- Salgado-Gálvez, M.A., Zuloaga, D. & Cardona, O.D. (2013). Evaluación probabilista del riesgo sísmico de Bogotá y Manizales con y sin la influencia de la Caldas Tear. *Revista de Ingeniería Universidad de Los Andes*, (38), 6-13.
- Salgado-Gálvez, M.A., Zuloaga, D., Bernal, G.A., Mora, M.G. & Cardona, O.D. (2014). Fully probabilistic seismic risk assessment considering local site effects for the portfolio of buildings in Medellín, Colombia. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(2), 671-695.
- SIMPAD, Universidad EAFIT, Integral, Ingeominas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. (1999). *Instrumentación y microzonificación sísmica del área urbana de Medellín*.
- Zuloaga, D. (2011). *Implicaciones en la estimación del riesgo sísmico de Bogotá como resultado de una nueva interpretación sismo-tectónica*. (Tesis inédita de pregrado). Universidad de Los Andes, Bogotá D.C., Colombia.