

# Evaluación probabilista del riesgo sísmico de Bogotá y Manizales con y sin la influencia de la Caldas Tear

Probabilistic Seismic Risk Assessment of Bogota and Manizales with and Without the Influence of Caldas Tear Fault

Mario Andrés Salgado-Gálvez <sup>(1)</sup>, Daniela Zuloaga-Romero <sup>(2)</sup>, Omar D. Cardona-Arboleda <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> MSc en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. mario.sal.gal@gmail.com

<sup>(2)</sup> Estudiante de maestría, Illinois Institute of Technology, Chicago, Estados Unidos. dzuloaga@hawk.iit.edu

<sup>(3)</sup> Ph.D. Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural. Profesor, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, Colombia. odcardonaa@unal.edu.co

Recibido 12 de septiembre de 2012, aprobado 15 de marzo de 2013.

## Palabras claves

Amenaza sísmica, análisis probabilista de riesgo, riesgo sísmico.

## Resumen

La nueva interpretación tectónica que propone la existencia de una falla denominada Caldas Tear ha motivado una evaluación de amenaza sísmica a nivel nacional, usando la misma metodología e información del estudio de amenaza sísmica actualizado para el Reglamento NSR-10. Con ambos resultados, se realiza la evaluación de riesgo sísmico de Bogotá y Manizales obteniendo la curva de excedencia de pérdidas, pérdidas máximas probables y la pérdida anual esperada. En la estimación de las pérdidas de las edificaciones de ambas ciudades, se consideran las microzonificaciones. La comparación permite observar la disminución y aumento del riesgo sísmico en Bogotá y Manizales respectivamente.

## Key words

Seismic risk, Probabilistic risk assessment, seismic hazard.

## Abstract

The new tectonic interpretation proposing the existence of a fault called Caldas Tear has led to a seismic hazard assessment at national level using the same methodology and information of the seismic hazard study updated for the national building code NSR-10. Both results are used for a probabilistic seismic risk assessment of Bogotá and Manizales obtaining the loss exceedance curve, probable maximum losses, and the average annual loss. For the estimation of the future losses on the buildings of both cities, microzonations are taken into account. The comparison presents a decrease and increase of seismic risk in Bogotá and Manizales respectively.

## INTRODUCCIÓN

En enero de 2011, durante la conferencia Penrose de la American Geophysical Union, realizada en Manizales, se planteó la existencia de una falla geológica que se le denominó Caldas Tear la cual tiene un alineamiento E-W y cruza la zona andina colombiana (Vargas y Pedraza, 2011; Vargas y Mann, 2013). Puesto que este tipo de fuente sismogénica podría tener influencia en el cálculo de la amenaza sísmica, se consideró de interés llevar a cabo la evaluación probabilista de amenaza sísmica a nivel nacional utilizando la misma metodología e información base del Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia 2009 (EGASC; Comité AIS-300, 2010; Salgado, 2010; Salgado, Bernal, Yamín, et al., 2010).

Como resultado de dicho análisis se obtuvo un conjunto de escenarios sísmicos, obtenidos en forma estocástica, que han permitido realizar la evaluación probabilista de riesgo sísmico en Bogotá y Manizales, calculando para todos los predios de dichas ciudades la curva de excedencia de pérdidas (CEP), los valores de pérdida máxima probable (PML por sus siglas en inglés) y de pérdida anual esperada (PAE). En Colombia, estas dos ciudades se distinguen por contar con muy buena información para la evaluación de riesgo sísmico porque no sólo se cuenta con una base de datos de edificaciones, debidamente organizada, sino también hay estudios de microzonificación sísmica los cuales son fundamentales al momento de realizar este tipo de análisis. La evaluación se realizó para el portafolio completo de edificaciones en ambas

ciudades, de manera separada, caracterizando las diferentes clases estructurales mediante las funciones de vulnerabilidad apropiadas.

Estos estudios contribuyen a la gestión del riesgo sísmico a nivel nacional y local. Los resultados obtenidos son útiles no sólo con el fin de cuantificar las pérdidas potenciales, que tiene especial relevancia para evaluar el impacto macroeconómico de futuros sismos, sino para desarrollar estrategias de protección financiera, a través de instrumentos de retención y transferencia del riesgo –seguros y reaseguros–, y de reducción del riesgo mediante programas de mitigación de la vulnerabilidad física de mediano y largo plazo.

## METODOLOGÍA

La evaluación probabilista de riesgo se realizó utilizando los diferentes módulos de la Plataforma CAPRA<sup>1</sup>. Para el cálculo de la amenaza se utilizó el programa CRISIS2007 V7.6 (Ordaz, Aguilar y Arboleda, 2007). La vulnerabilidad sísmica se realizó según la metodología y formatos CAPRA (ERN-AL, 2009), así como para el cálculo del riesgo se utilizó el módulo CAPRA-GIS (ERN-AL, 2011) que integra dichos componentes. Para la estimación de las pérdidas físicas asociadas a cada edificación se requiere de su identificación y caracterización en términos de sistema estructural, edad y valor de reposición. La Figura 1 presenta el diagrama de evaluación probabilista de riesgo sísmico utilizando la Plataforma CAPRA.

## EVALUACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA

Para la evaluación de la amenaza sísmica en roca se contó con la información del modelo utilizado para el EGASC. Se utilizó la nueva descripción tectónica propuesta de la Caldas Tear, con el fin de realizar una nueva asignación de los eventos contenidos del catálogo sísmico, utilizando exactamente el mismo catálogo para facilitar la comparación con el estudio

realizado para el Reglamento NSR-10 (Decreto 926 de 2010) y tomando en cuenta que desde el 28 de mayo de 2008 no se registran eventos de magnitud importante en el país. La Caldas Tear se entiende como una fractura en la placa de Nazca que a su vez se identifica como un límite en el comportamiento de ciertos patrones tectónicos y de sismicidad en el país. Hacia el norte, la placa tiene menores tasas de desplazamiento y un ángulo de subducción de 24°, mientras que hacia el sur la tasa de desplazamiento es mayor y el ángulo de subducción se aproxima a los 35° (Vargas y Pedraza, 2011).

La Caldas Tear tiene un alineamiento E-W el cual interactúa con diferentes fallas conocidas con alineamiento N-S como Murindó, Romeral, Palestina, Salinas y Frontal Cordillera Oriental. Se definieron corredores de asignación de 60km, como habían sido definidos en el modelo del EGASC dando prioridad para este segundo modelo de amenaza al de la Caldas Tear como se muestra en la Figura 2.

Se utilizó un modelo de sismicidad local de Poisson (Cornell, 1968) para la caracterización de las fuentes y se utilizó el modelo geométrico de plano fuente. De esta forma la metodología de la evaluación de la amenaza sísmica en roca es totalmente compatible con la utilizada en el modelo del EGASC y los resultados pueden ser comparados de manera directa.

Las leyes de atenuación utilizadas para esta interpretación son las mismas del modelo del EGASC. Estas leyes de atenuación son espectrales para considerar que ondas con diferente contenido frecuencial atenúan de manera diferente y además permiten la obtención de las intensidades para diferentes ordenadas espectrales, indispensables para un correcto análisis probabilista de riesgo sísmico.

Por haberse utilizado leyes de atenuación espectrales, es posible, para ambas ciudades, el cálculo de espectros de amenaza uniforme (EAU). Las Figuras 3 a 6 presentan la comparación de los resultados de amenaza sísmica con ambos modelos para 475 y 2,500 años de período de retorno en las dos ciudades analizadas.

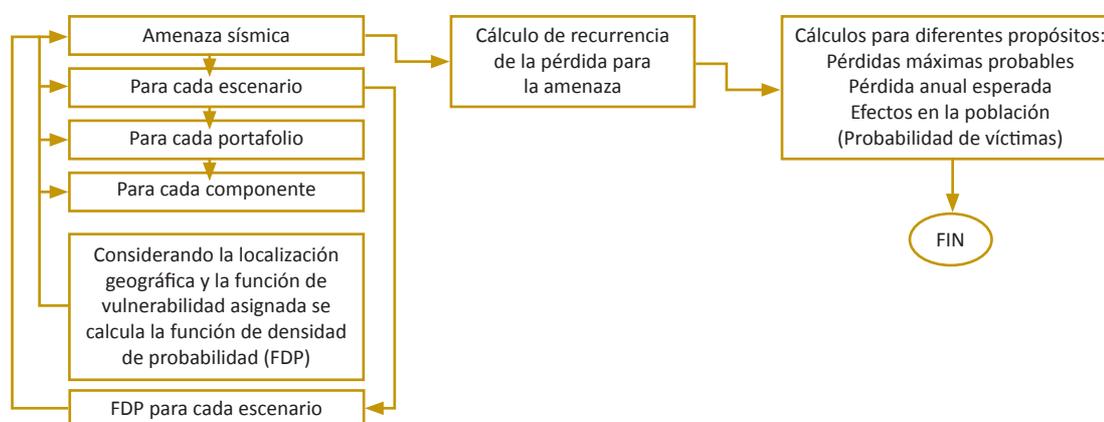


Figura 1. Metodología de evaluación probabilista de riesgo sísmico

1 Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment (www.ecapra.org)

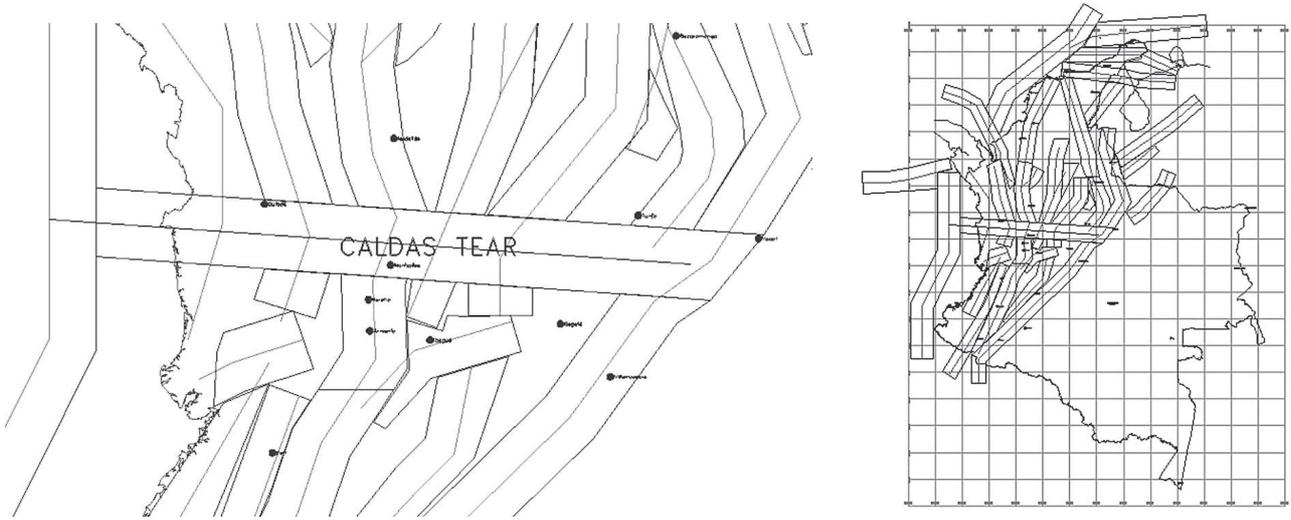


Figura 2. Corredores de asignación para el área de interés

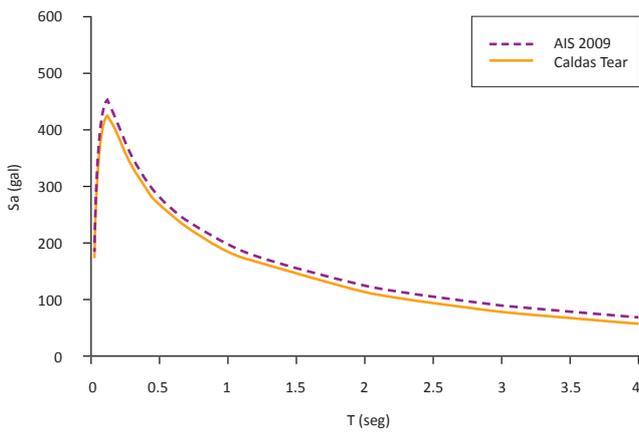


Figura 3. Comparación de EAU; Bogotá, 475 años

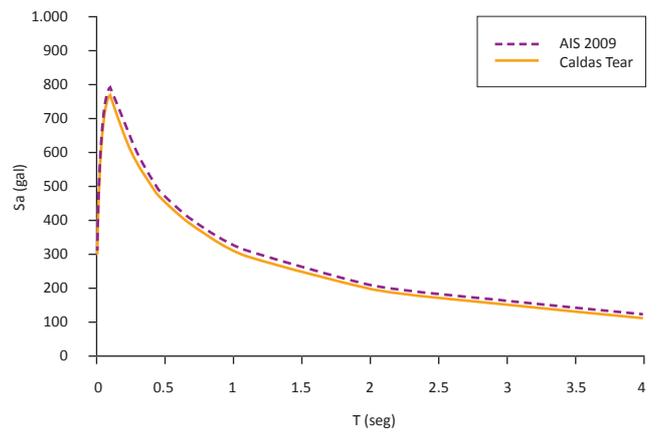


Figura 4. Comparación de EAU; Bogotá, 2,500 años

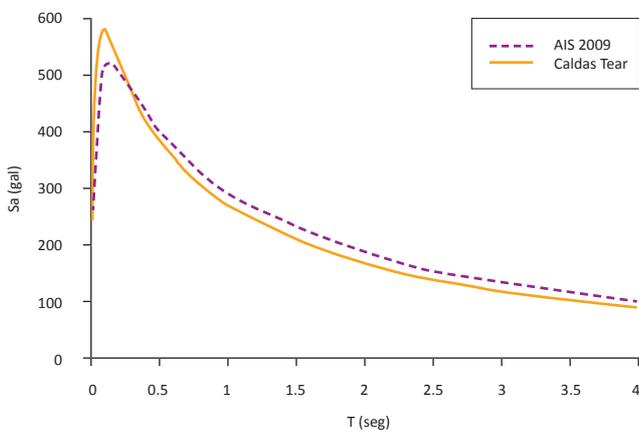


Figura 5. Comparación de EAU; Manizales, 475 años

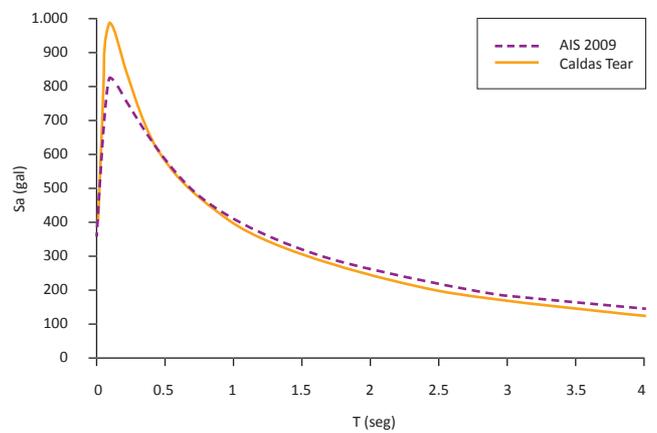


Figura 6. Comparación de EAU; Manizales, 2,500 años

## EFECTOS DE SITIO

Cuando se cuenta con suelos blandos, el efecto de amplificación y modificación de contenido frecuencial y de duración del movimiento desde el punto de vista sísmico puede ser importante y debe ser tenido en cuenta al momento de calcular las intensidades esperadas en superficie. Usando la información disponible en los estudios de microzonificación de cada ciudad, fueron calculadas funciones de transferencia espectrales para las mismas ordenadas espectrales calculadas en roca, como las presentadas en la Figura 7 (donde se presentan para tres zonas diferentes en Bogotá), con diferentes intensidades de movimiento en la base y así incluir los efectos de sitio en la evaluación de riesgo sísmico. Para Bogotá, del estudio más reciente relacionado con aspectos de la modelación de la respuesta dinámica del suelo (CEDERI, 2006), es posible definir 45 zonas, mientras que para Manizales es posible definir 24 zonas (CIMOC y CEDERI, 2002). Cada una está caracterizada mediante funciones de transferencia únicas, las cuales a su vez consideran efectos adicionales por amplificación topográfica.

## ELEMENTOS EXPUESTOS

Para ambas ciudades se contó con una base de datos con información predio a predio que se completó con una serie de características y parámetros mínimos requeridos para la realización de una evaluación probabilista de riesgo como el sistema estructural, la edad, la altura y el valor de reposición, ajustado mediante índices que toman en cuenta el uso y el nivel socioeconómico de cada edificación. Lo anterior se realizó de manera individual para cada elemento que se encuentra en la base de datos. Posteriormente se llevó a cabo la asignación de los tipos estructurales que predominan en ambas ciudades: mampostería (simple, confinada y reforzada), pórticos en concreto reforzado resistentes a momento, sistemas duales, sistemas en concreto de placa-columna, concreto prefabricado, pórticos en acero resistentes a momento y estructuras de adobe, tapia pisada y bahareque. Para cada sistema o tipo estructural, considerando el número de pisos, se estableció un período fundamental de vibración a partir de modelaciones analíticas para cada clase estructural y se utilizó dicha ordenada espectral del archivo de amenaza

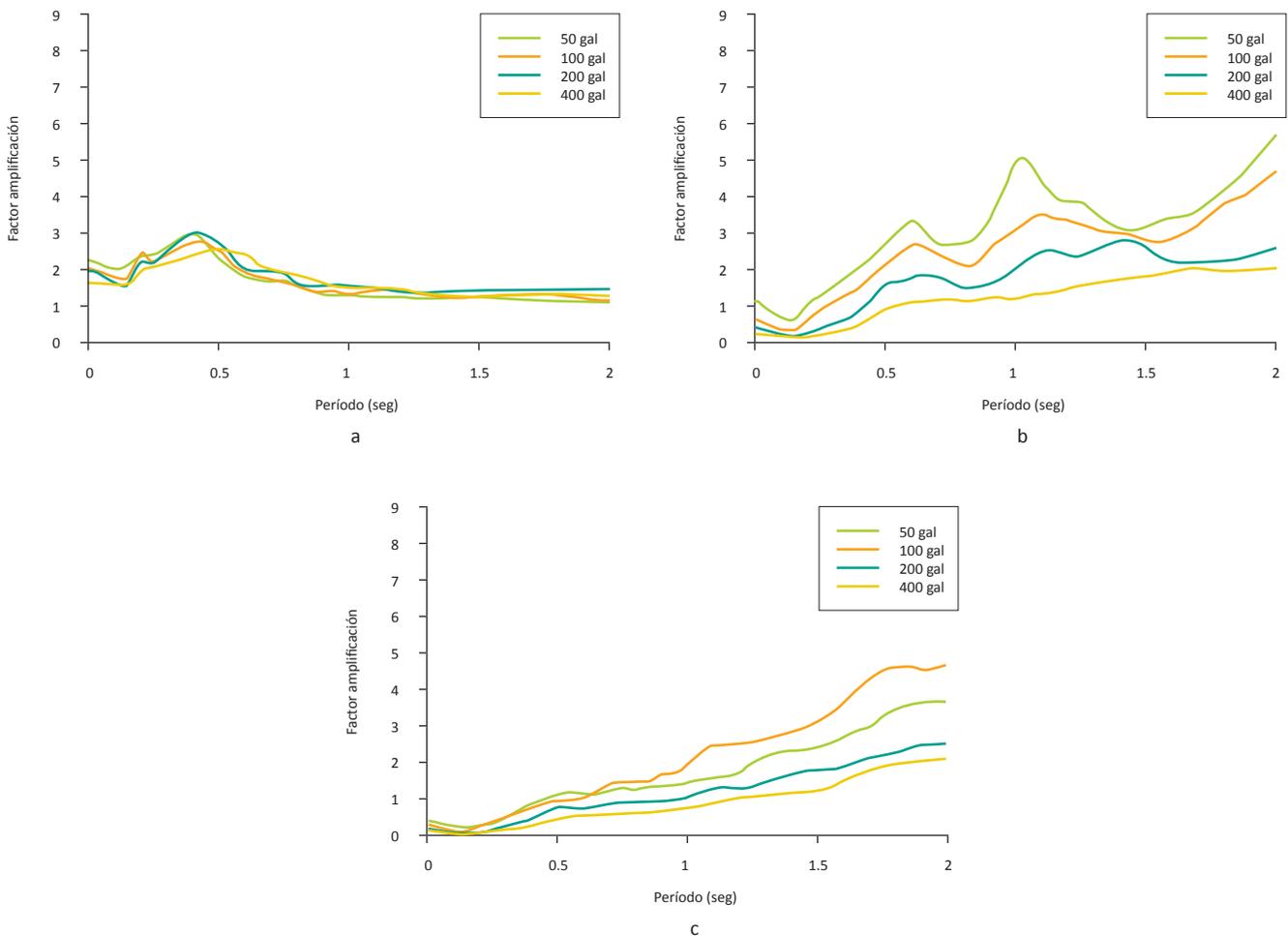


Figura 7. Ejemplos de funciones de transferencia en Bogotá; a) suelos duros, b) suelos intermedios, c) suelos blandos

para asignar la intensidad, en términos de aceleraciones espectrales de cada escenario estocástico a cada elemento de la base de datos. Para la ciudad de Bogotá se contó con 866,915 edificios identificados y caracterizados en la base de datos utilizada mientras que para la ciudad de Manizales se contó con 85,816 edificaciones.

## VULNERABILIDAD DE LOS ELEMENTOS EXPUESTOS

Mediante las funciones de vulnerabilidad es posible obtener, de una manera continua, diferentes niveles de daño para diferentes intensidades (aceleración espectral en este caso) de los elementos expuestos. Se asignan diferentes funciones de vulnerabilidad para cada clase estructural identificada en la base de elementos expuestos las cuales se definieron a partir de estudios previos realizados en ambas ciudades (ERN-Colombia, 2006; Ingeniar Ltda y ITEC, 2005).

Para el sistema constructivo de bahareque en la ciudad de Manizales, que se encuentra localizado principalmente en la zona del centro histórico de la ciudad, se determinó una función de vulnerabilidad considerando diferentes tipos de cubierta (liviana y teja de barro) considerando así el buen comportamiento ante sollicitaciones sísmicas de dichas edificaciones en eventos previos.

La Figura 8 presenta las funciones de vulnerabilidad utilizadas. A partir de estas curvas es posible identificar diferencias significativas en los daños esperados para los diferentes sistemas estructurales para una misma intensidad en la base de cada estructura.

## RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE RIESGO SÍSMICO

Para la evaluación probabilista de riesgo sísmico, expresado en términos de pérdidas monetarias directas, se sigue un proceso de generación de pérdidas mediante un proceso de Poisson donde el tiempo de ocurrencia entre los eventos es desconocido. Para cada evento, en el archivo de amenaza sísmica, se requiere determinar la distribución de probabilidad de pérdidas dado que éste ha ocurrido, lo cual se realiza encadenando las siguientes distribuciones de probabilidad condicionales con la Ecuación 1 (Ordaz, 2000).

$$f(p|Evento i) = \int_0^{\infty} f(p|S_a) f(S_a|Evento i) dS_a \quad (1)$$

Donde  $f(p|Evento_i)$  es la función de distribución de probabilidad de pérdidas condicionada a la ocurrencia de un evento;  $f(p|S_a)$  es la distribución de probabilidad de daño condicionado a una intensidad (vulnerabilidad) y  $f(S_a|Evento_i)$  es la función de probabilidad de intensidades condicionada a la ocurrencia del  $i$ -ésimo evento (amenaza). De esta manera se obtiene la tasa de excedencia para diferentes niveles de pérdidas con la Ecuación 2, donde  $v(p)$  es la tasa de excedencia de la pérdida física;  $Pr(P>p|Evento i)$  es la probabilidad de excedencia de la pérdida condicionada a la ocurrencia del evento y  $F_A(Evento i)$  es la frecuencia anual de ocurrencia

del evento, calculando así la curva de excedencia de pérdidas desde donde es posible derivar resultados en términos de la pérdida anual esperada así como de pérdidas máximas probables para diferentes períodos de retorno.

$$v(p) = \sum_{i=1}^{Eventos} Pr(P>p|Evento i) F_A(Evento i) \quad (2)$$

## RESULTADOS PARA BOGOTÁ

En la Figura 9 se presentan los resultados de riesgo sísmico para Bogotá (Zuloaga, 2011) considerando los dos modelos de amenaza en roca en términos de la curva de excedencia de pérdidas y la curva de PML para ambos modelos de amenaza. La Tabla 1 permite comparar la pérdida anual esperada obtenida para ambos casos así como la pérdida máxima probable para algunos períodos de retorno. Los resultados de riesgo son siempre menores cuando se utiliza el modelo de amenaza que considera la fuente sismogénica Caldas Tear, existiendo una disminución del 23% en la pérdida anual esperada y del 10% para el PML de 1,000 años.

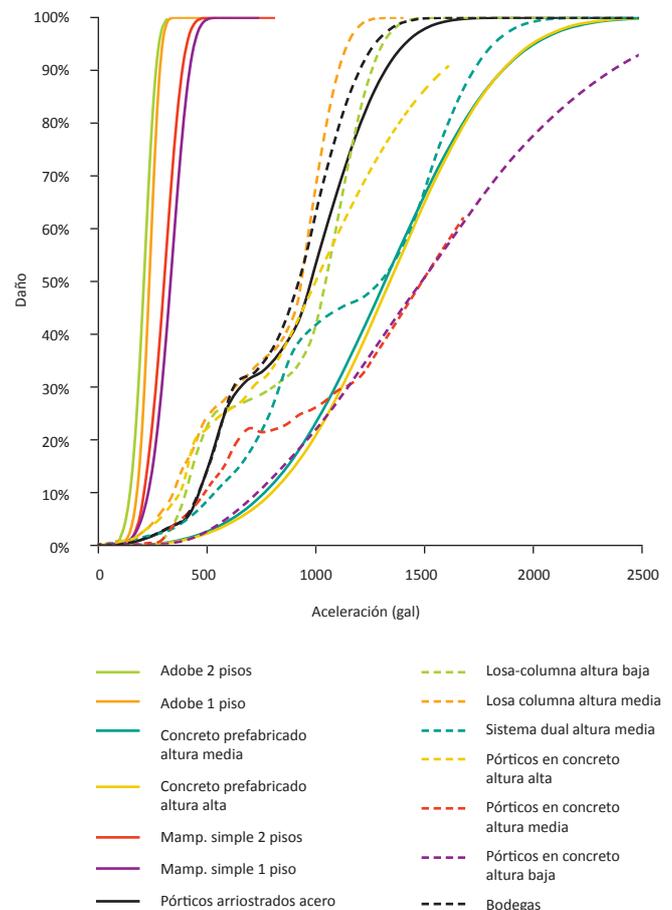


Figura 8. Funciones de vulnerabilidad utilizadas en el análisis

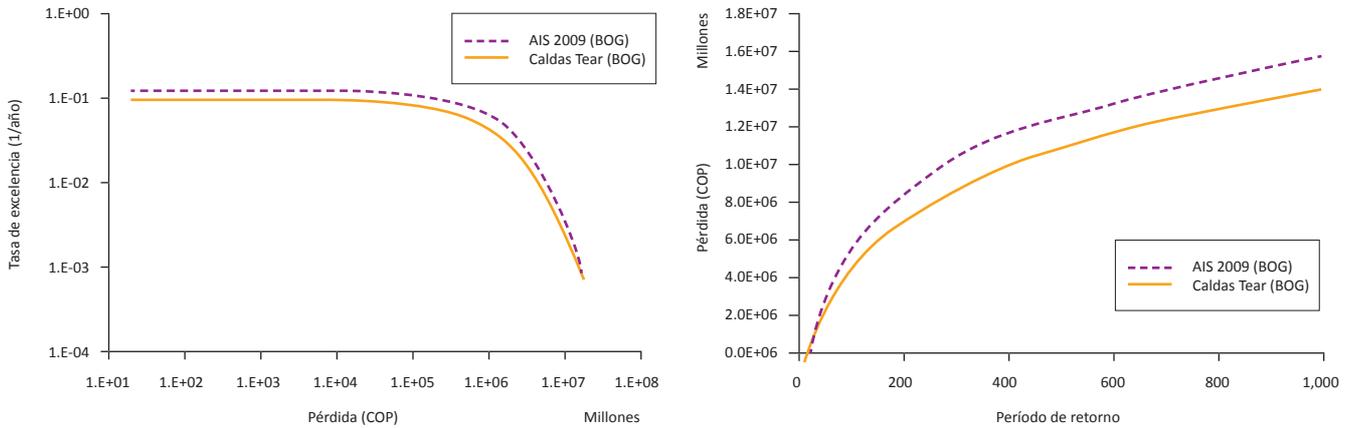


Figura 9. Curva de excedencia de pérdida y de pérdidas máximas probables para Bogotá

Tabla 1. Comparación de resultados de riesgo sísmico en Bogotá para los dos modelos de amenaza sísmica

Modelo	AIS-2009		Caldas Tear	
Valor expuesto	COP\$ x 10 <sup>6</sup>	100,316,000	COP\$ x 10 <sup>6</sup>	100,316,000
PAE	COP\$ x 10 <sup>6</sup>	252,350	COP\$ x 10 <sup>6</sup>	194,006
	‰	2.516	‰	1.934
PML				
Período de retorno	Pérdida		Pérdida	
	años	COP\$ x 10 <sup>6</sup>	%	COP\$ x 10 <sup>6</sup>
100	\$6,041,078	6.02	\$4,921,600	4.91
250	\$9,617,823	9.59	\$8,102,422	8.08
500	\$12,623,801	12.58	\$10,958,366	10.92
1000	\$15,970,367	15.92	\$13,973,154	13.93

La Tabla 2 presenta los resultados de riesgo obtenidos para los dos modelos de amenaza clasificados por sistema estructural.

Del análisis que el riesgo sísmico de Bogotá se encuentra concentrado en edificaciones de adobe y pórticos en concreto con losa columna. La mampostería y pórticos en concreto resistentes a momento concentran en términos monetarios la mayoría de las pérdidas pero debe considerarse que entre estos dos sistemas estructurales suman más del 90% de edificaciones de la ciudad.

### RESULTADOS PARA MANIZALES

En la Figura 10 se presentan los resultados de riesgo sísmico para Manizales considerando los dos modelos de amenaza en roca en términos de la curva de excedencia de pérdidas y la curva de PML. La Tabla 3 permite comparar la pérdida anual esperada obtenida para ambos casos así como la pérdida máxima probable para algunos periodos de retorno. Los resultados de riesgo son mayores cuando se utiliza el modelo de amenaza que considera la fuente sísmogénica Caldas Tear, existiendo un aumento del 18% en la pérdida anual esperada y del 5% para el PML de 1,000 años.

Tabla 2. Distribución de pérdidas por sistemas estructurales de Bogotá

Sistema Estructural	Distribución		Valor de reposición		Pérdidas anuales esperadas AIS-2009			Pérdidas anuales esperadas Caldas Tear		
	#	%	Millones COP	%	Millones COP	‰	Participación	Millones COP	‰	Participación
Mampostería	761.486	87,8%	\$ 42.451.429	42,3%	\$ 91.826	2,16	36,4%	\$ 74.400	1,75	38,4%
Pórticos en concreto resistentes a momento	32.442	3,7%	\$ 42.833.551	42,7%	\$ 123.573	2,88	49,0%	\$ 91.800	2,14	47,3%
Sistemas duales	1.044	0,1%	\$ 3.702.217	3,7%	\$ 7.966	2,15	3,2%	\$ 5.970	1,61	3,1%
Pórticos en concreto (losa-columna)	5.463	0,6%	\$ 4.290.591	4,3%	\$ 12.914	3,01	5,1%	\$ 9.600	2,24	4,9%
Concreto prefabricado	12.604	1,5%	\$ 398.214	0,4%	\$ 260	0,65	0,1%	\$ 190	0,48	0,1%
Pórticos en acero resistentes a momento	27.469	3,2%	\$ 6.125.644	6,1%	\$ 9.462	1,54	3,7%	\$ 6.900	1,13	3,6%
Adobe	26.407	3,0%	\$ 514.474	0,5%	\$ 6.349	12,34	2,5%	\$ 5.100	9,91	2,6%
TOTAL	866.915	100,0%	\$ 100.316.120	100,0%	\$ 252.350	2,52	100,0%	\$ 193.960	1,93	100,0%

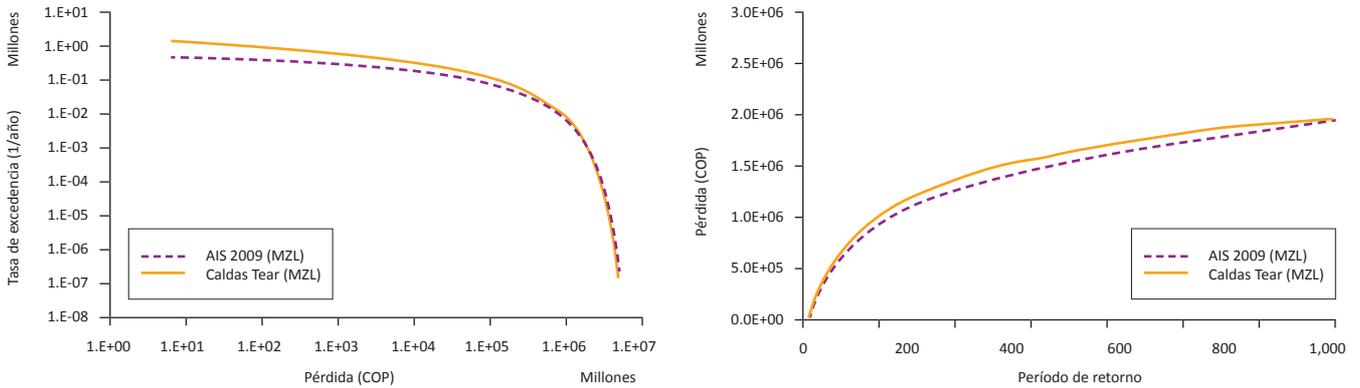


Figura 10. Curva de excedencia de pérdida y de pérdidas máximas probables para Manizales

Tabla 3. Comparación de resultados de riesgo sísmico en Manizales para los dos modelos de amenaza sísmica

Modelo	AIS-2009		Caldas Tear	
Valor Expuesto	COP\$ x10 <sup>6</sup>	5,628,510	COP\$ x10 <sup>6</sup>	5,628,510
Pérdida anual esperada	COP\$ x10 <sup>6</sup>	35,798	COP\$ x10 <sup>6</sup>	42,473
	%	6.360	%	7.546
PML				
Periodo retorno	Pérdida		Pérdida	
años	COP\$ x10 <sup>6</sup>	%	COP\$ x10 <sup>6</sup>	%
100	\$754,412	13,40	\$822,883	14,62
250	\$1,186,697	21,08	\$1,251,129	22,23
500	\$1,533,753	27,25	\$1,581,238	28,09
1000	\$1,894,666	33,66	\$1,961,644	34,85

La Tabla 4 presenta los resultados de riesgo obtenidos para los dos modelos de amenaza sísmica clasificados por sistema estructural. Se puede observar que las pérdidas en términos relativos y de participación en el portafolio se encuentran concentradas en los sistemas estructurales de mampostería, el cual representa un número considerable de edificaciones para la ciudad.

### CONCLUSIONES

Con los resultados del presente estudio se puede concluir lo siguiente:

1. La consideración de la interpretación tectónica que plantea la fuente sismogénica Caldas Tear tiene efectos de aumento en la amenaza sísmica para Manizales del orden del 10% y disminución en Bogotá del orden del 5% al compararse con los obtenidos para el Reglamento NSR-10 para la aceleración máxima del suelo. Lo anterior no tiene implicaciones en términos de diseño sismo resistente al estar definidos los requisitos en términos de zonas de amenaza que no tienen modificaciones para estas ciudades tras esta evaluación.
2. La variación de la amenaza considerando la Caldas Tear a pesar de ser baja, se refleja en la evaluación de riesgo sísmico, en una reducción de la pérdida anual esperada del orden del 23% para Bogotá y en un aumento de esta en el orden de 18% para Manizales. Esta variación es importante y se sugiere la consideración de la Caldas Tear en modelaciones enfocadas a instrumentos de transferencia del riesgo.
3. Para Manizales el aumento en las pérdidas asociadas a bajas tasas de excedencia es del orden del 5% mostrando así

Tabla 4. Caracterización por sistemas estructurales de Manizales

Sistema Estructural	Distribución		Valor de reposición		Pérdidas anuales esperadas AIS-2009			Pérdidas anuales esperadas Caldas Tear		
	#	%	Millones COP	%	Millones COP	%	Participación	Millones COP	%	Participación
Adobe	3,063	3.6%	\$ 174,804	3.1%	\$ 1,893	10.83	5.3%	\$ 1,698	9.71	4.0%
Bahareque	15,222	17.7%	\$ 1,184,753	21.0%	\$ 6,651	5.61	18.6%	\$ 5,515	4.66	13.0%
Concreto prefabricado	349	0.4%	\$ 7,771	0.1%	\$ 3	0.45	0.0%	\$ 4	0.50	0.0%
Mampostería	49,838	58.1%	\$ 3,035,532	53.9%	\$ 23,945	7.89	66.9%	\$ 32,273	10.63	76.0%
Pórticos en concreto (losa-columna)	7,716	9.0%	\$ 638,033	11.3%	\$ 1,871	2.93	5.2%	\$ 1,590	2.49	3.7%
Pórticos en concreto resistentes a momento	9,628	11.2%	\$ 587,621	10.4%	\$ 1,433	2.44	4.0%	\$ 1,394	2.37	3.3%
TOTAL	85,816	100.0%	\$ 5,628,515	100.0%	\$ 35,798	6.36	100.0%	\$ 42,473	7.55	100.0%

la influencia en los resultados de los eventos cercanos y moderados que ocurren con mayor frecuencia asociados con los resultados en términos de la pérdida anual esperada y PML de bajos períodos de retorno.

4. Los resultados para ambos portafolios analizados pueden desglosarse en las diferentes características incluidas en la base de datos como uso principal, sistema estructural, número de pisos y edad. Para ambas ciudades se encontró que las edificaciones construidas antes de 1984 y de materiales en tierra concentran en términos relativos los mayores valores de riesgo, aunque la participación de la pérdida se concentra en los sistemas de mampostería y pórticos de concreto reforzado, al ser en su conjunto muchos más en cantidad.
5. Los resultados obtenidos permiten la generación de mapas de riesgo los cuales permiten una visualización de la distribución geográfica de las pérdidas futuras; sin embargo, debe tenerse en cuenta que el riesgo preferiblemente debe expresarse en tasas de excedencia de pérdidas y no únicamente a través de mapas.
6. Es importante la actualización de este tipo de análisis cuando se cuente con información adicional relacionada con la amenaza sísmica o la actualización de las bases de datos de elementos expuestos, particularmente en la medida que se actualicen las bases de datos catastrales y sus valores. Los resultados que se obtengan tienen una especial relevancia para el diseño de instrumentos de transferencia del riesgo, como el seguro colectivo que existe en Manizales y que otros estudios indican se podría implementar en Bogotá, estrategias de reducción de vulnerabilidad y elaboración de planes de contingencia.

## REFERENCIAS

- Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos (CEDERI). (2006). *Actualización de la microzonificación sísmica de la Ciudad de Bogotá*. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Los Andes. Bogotá.
- Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles (CI-MOC) & Centro de Estudios Sobre Desastres y Riesgos (CEDERI). (2002). *Microzonificación sísmica de la Ciudad de Manizales*. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Los Andes. Recuperado de: [http://idea.manizales.unal.edu.co/gestion\\_riesgos/descargas/microzon/informe\\_final.pdf](http://idea.manizales.unal.edu.co/gestion_riesgos/descargas/microzon/informe_final.pdf)
- Comité AIS-300. (2010). *Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia 2009*. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- Cornell, A. (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 Construcción Sismo Resistente NSR-10. M.A.V.D.T. (2010).
- Evaluación de Riesgos Naturales – Colombia (ERN-Colombia). (2006). *Estimación de pérdidas económicas para diferentes escenarios de riesgo en edificaciones públicas y privadas en Bogotá y análisis económico del riesgo residual en el Distrito Capital de Bogotá*. Bogotá
- Evaluación de Riesgos Naturales – América Latina (ERN-AL). (2009). *Vulnerabilidad de edificaciones e infraestructura*. (Informe técnico ERN-CAPRA-T1-5), Recuperado de: [www.ecapra.org](http://www.ecapra.org)
- 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](http://www.ecapra.org)
- Ingenier Ltda. & Ingeniería Técnica y Científica (ITEC). (2005). Sistema de información sísmica de Manizales, (Versión 1.1.0) [Sistema de información geográfica para gestión de riesgo sísmico].
- 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. Aguilar, A. & Arboleda J. (2007). CRISIS2007 V7.6. [Programa para la evaluación de la amenaza sísmica]. Recuperado de: [www.ecapra.org](http://www.ecapra.org)
- Salgado, 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.
- Salgado, M.A., Bernal G.A., Yamín 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*, 32, 28–37.
- Vargas, C.A. & Pedraza F.L. (2011, mayo 7). Nueva falla geológica altera mapa de amenaza sísmica en Colombia. *UN Periódico*, pp. 9.
- Vargas C.A. & Mann P. (2013). Tearing and breaking off of subducted slabs as the result of collision of the Panama Arc-Indenter with northwestern South America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(3), 2025–2046.
- 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.