

Evaluación probabilista y espectral de la amenaza sísmica de Colombia y su uso en el nuevo código de puentes

Probabilistic and spectral seismic hazard assessment of Colombia and its use in the new code of bridges

Mario A. Salgado-Gálvez¹⁻³, Gabriel A. Bernal¹⁻³, Daniela Zuloaga¹⁻³ y Omar Darío Cardona^{1-2-3*}

¹Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Comité AIS-300

²Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia

³INGENIAR: Grupo de Consultoría.

RESUMEN

En el marco de la actualización del Código Colombiano de Puentes, el Comité AIS-300 ha realizado una evaluación de la amenaza sísmica en roca a nivel nacional utilizando información actualizada con respecto al Estudio General de Amenaza Sísmica realizado para el Reglamento NSR-10, en términos del catálogo utilizado, con 5 años más de información y las relaciones de atenuación de movimiento fuerte, calibradas a partir de registros locales. Para la presente actualización se ha evaluado la amenaza sísmica con un enfoque probabilista y espectral con el objetivo de establecer los valores de los coeficientes sísmicos de diseño, denominados ahora como PGA, Ss y S1, asociados, en esta ocasión, a una probabilidad de excedencia del 7% en 75 años, lo que equivale, aproximadamente, a un período de retorno promedio de 975 años.

Palabras clave: Evaluación probabilista, amenaza sísmica, Código Colombiano de Puentes.

ABSTRACT

In the framework of the update of the Colombian Code of Bridges, the Committee AIS-300 has developed a seismic hazard assessment at bedrock level, using updated information, if compared with the latest General Study on Seismic Hazard conducted for the Seismic Building Code, NSR-10, in terms of the employed catalog, with 5 years of additional information and the ground motion prediction equations, calibrated with local accelerograms. For this update, seismic hazard has been assessed with a probabilistic and spectral approach in order to define the values of the seismic coefficients denoted now as PGA, Ss and S1, associated, in this occasion to a probability of exceedance of 7% in 75 years, which is equivalent, approximately, to a mean return period of 975 years.

Keywords: Probabilistic assessment, seismic hazard, Colombian Code of Bridges.

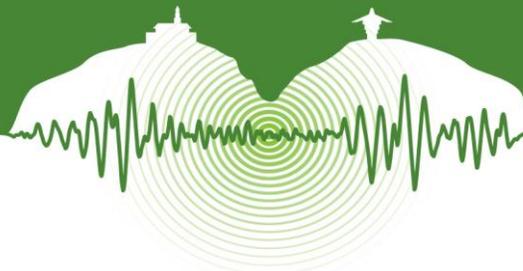
1 INTRODUCCIÓN

En la versión anterior del Código Colombiano de Puentes, CCP, la forma espectral se definía a partir de un único coeficiente sísmico, expresado en términos de la aceleración máxima del terreno (Aa) asociado a una probabilidad de excedencia del 10% en un lapso de 50 años, lo que equivale, aproximadamente, a un período de retorno promedio de 475 años. Para la presente actualización se ha evaluado la amenaza sísmica con un enfoque probabilista con el objetivo de establecer los valores de los coeficientes sísmicos de diseño denominados como PGA, Ss y S1 asociados, en esta ocasión, a una probabilidad de excedencia del 7% en un lapso de 75 años, lo que equivale, aproximadamente, a un período de retorno promedio de 975 años. El coeficiente PGA corresponde a la aceleración máxima del terreno (0.0 segundos) mientras que Ss y S1 corresponden a los valores de la amenaza, asociados a los períodos de vibración iguales a 0.2 y 1.0 segundos respectivamente.

2 ACTUALIZACIÓN DE LA AMENAZA

Para este caso se han utilizado las mismas fuentes sismogénicas del estudio realizado en 2010. Para cada una de ellas, se ha conservado tanto la misma geometría como el mismo modelo geométrico, que, corresponde al conocido como área fuente. En resu-

* odcardonaa@unal.edu.co



men, se consideran un total de 38 fuentes sismogénicas, de la cuales 33 corresponden a fuentes asociadas con sismicidad superficial (eventos con profundidad entre 0 y 60 km) mientras las 5 restantes dan cuenta de la sismicidad profunda (eventos con profundidad mayor a 60 km).

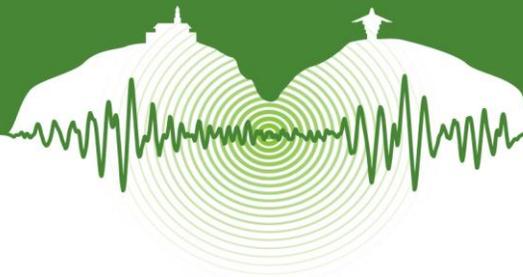
2.1 Catálogo y parámetros de sismicidad

Un cambio con respecto al estudio del 2010 es el catálogo de eventos que se acá se utiliza para la parametrización de las fuentes. En el anterior estudio, el catálogo tenía corte a 28 de diciembre de 2008 mientras que el que aquí se ha utilizado tiene corte a 31 de mayo de 2013. Para incluir estos casi 5 años de información adicional se ha utilizado información reportada por National Earthquake Information Center del Servicio Geológico de los Estados Unidos de América (NEIC-USGS) y del catálogo desarrollado por el International Seismological Centre en el marco del proyecto Global Earthquake Model (ISC-GEM). Para el cálculo de la amenaza se asume un modelo de sismicidad de Poisson, por lo que para garantizar la compatibilidad con la suposición de independencia entre los eventos se ha realizado un procedimiento de remoción de réplicas y premonitorios sobre la información de sismos históricos adicional. El año de inicio de completitud del catálogo, por usarse la misma magnitud umbral del estudio de 2010 es la misma. Tras la remoción de réplicas se cuenta con un total de 7.650 eventos, los cuales son alrededor de 250 más de los existentes en el estudio de 2010.

En cuanto a los parámetros de sismicidad se ha mantenido una magnitud umbral (M_0) igual a 4.0 mientras que para el cálculo de los parámetros a y b (denotados acá como λ_0 y β respectivamente) de la curva de recurrencia de Gutenberg y Richter se ha utilizado la metodología estadística de máxima verosimilitud. El valor b (β), por tratarse de una función desconocida, es considerado como una variable aleatoria, por lo que para considerar la incertidumbre asociada a este adicional al valor esperado, se calcula su coeficiente de variación. Los valores de magnitud última asociada a cada fuente se mantienen iguales a los del estudio de 2010; dado que existe incertidumbre en la estimación de estos, adicionalmente se asume un valor de desviación estándar de 0.2 para cada una de las fuentes y se considera que siguen una distribución normal. La Tabla 1 presenta los parámetros de sismicidad para las 38 fuentes consideradas en el presente análisis.

Tabla 1: Parámetros de sismicidad para las fuentes sísmicas

Fuente	M_0	λ_0	β	$CV(\beta)$	M_u	σ_{M_u}
Arco de Dabeiba	4.0	2.480	1.605	0.090	6.9	0.2
Bahía Solano	4.0	2.540	1.318	0.089	7.5	0.2
Benioff Intermedia I	4.0	7.720	1.714	0.051	8.0	0.2
Benioff Intermedia II	4.0	3.220	1.431	0.079	8.0	0.2
Benioff Intermedia III	4.0	1.900	2.079	0.103	8.0	0.2
Benioff Profunda	4.0	6.220	2.000	0.057	7.5	0.2
Boconó	4.0	5.200	2.020	0.062	7.4	0.2
Bucaramanga-Santa Marta Norte	4.0	0.140	1.373	0.408	6.5	0.2
Bucaramanga-Santa Marta Centro	4.0	0.700	2.134	0.172	6.5	0.2
Bucaramanga-Santa Marta Sur	4.0	1.920	3.466	0.103	6.9	0.2
Cauca	4.0	4.700	2.574	0.065	7.5	0.2
Cimitarra	4.0	0.640	2.783	0.180	6.5	0.2
Compresión Caribe SE	4.0	0.700	1.651	0.172	6.5	0.2
Compresión Caribe SW	4.0	0.580	2.528	0.189	6.1	0.2
Cuiza	4.0	0.820	1.847	0.158	6.6	0.2
Espíritu Santo	4.0	0.300	1.546	0.267	6.5	0.2
Fallas del Magdalena	4.0	0.300	1.081	0.267	7.0	0.2
Frontal Cordillera Oriental Norte	4.0	1.500	1.558	0.116	8.0	0.2
Frontal Cordillera Oriental Centro	4.0	2.640	1.468	0.087	8.0	0.2
Frontal Cordillera Oriental Sur	4.0	2.280	2.049	0.094	8.0	0.2
Garrapatas	4.0	0.320	2.162	0.258	6.5	0.2
Ibagué	4.0	0.320	1.553	0.258	6.9	0.2
Junín	4.0	0.140	2.188	0.408	7.0	0.2
Murindó	4.0	2.800	1.411	0.084	7.5	0.2
Nido Bucaramanga	4.0	30.500	1.804	0.025	6.5	0.2
Normal Panamá-Pacífico	4.0	2.080	1.737	0.098	7.1	0.2
Oca	4.0	1.560	2.060	0.114	6.5	0.2
Palestina	4.0	0.900	1.786	0.151	6.5	0.2
Perijá	4.0	0.540	2.935	0.196	6.5	0.2
Puerto Rondón	4.0	0.260	1.526	0.288	6.7	0.2
Romeral	4.0	1.520	1.872	0.115	7.6	0.2
Romeral Norte	4.0	0.460	1.679	0.213	6.5	0.2
Salinas	4.0	1.340	1.791	0.123	6.5	0.2
Suárez	4.0	0.340	2.329	0.250	6.5	0.2
Subducción Norte	4.0	4.320	1.260	0.068	8.6	0.2
Subducción Centro	4.0	2.740	1.118	0.085	8.6	0.2
Subducción Sur	4.0	17.100	1.923	0.034	8.9	0.2
Uribante-Caparro	4.0	0.820	1.487	0.158	7.0	0.2



2.2 Atenuación sísmica

Dado que los coeficientes sísmicos están asociados a diferentes períodos fundamentales de vibración, se ha seleccionado una ley de atenuación espectral para dar cuenta que, ondas con diferente contenido frecuencial, atenuan de manera diferente. Las leyes de atenuación seleccionadas, también denominadas en el marco del GEM como ecuaciones de predicción del movimiento fuerte (GMPEs en inglés), están basadas en un modelo de espectro fuente y han sido calibradas a partir de la información de registros locales y se considera compatibles con el entorno tectónico Colombiano. Para el efecto se calibró un modelo de atenuación por cada mecanismo focal: cortical y subducción, utilizando información de la red nacional de acelerógrafos. Se emplearon 206 acelerogramas, 87 acelerogramas asociados a 22 terremotos corticales y 119 acelerogramas asociados a 15 terremotos de subducción. Mayor detalle ver artículo de Bernal *et al.* en las memorias del presente congreso. La Figura 1 ilustra el sesgo y la desviación estándar con las leyes de atenuación utilizadas previamente y la actual en el caso de los sismos corticales.

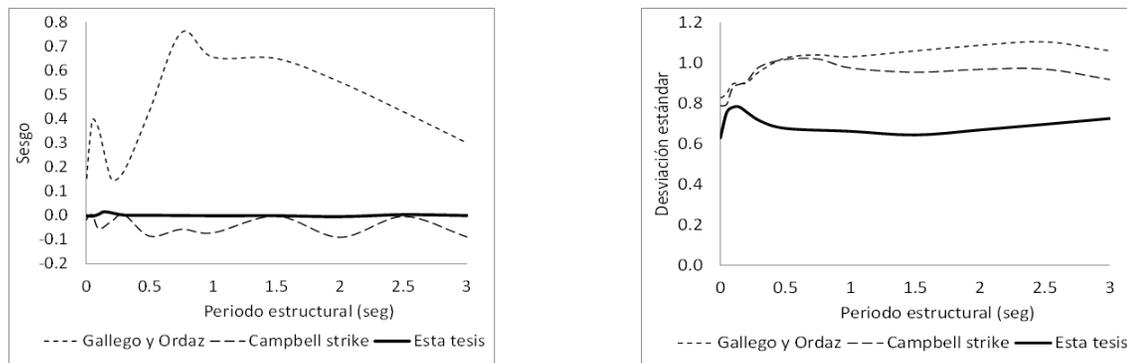


Figura 1: Comparación a la izquierda del sesgo y a la derecha de la desviación de las leyes de atenuación para sismos corticales.

2.3 Cálculo de la amenaza sísmica

Una vez determinados los parámetros de sismicidad de las fuentes y se les ha asociado un modelo de atenuación, es posible realizar el cálculo de la amenaza sísmica para determinar los valores de interés. Esto se realiza considerando para cada punto de análisis 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:

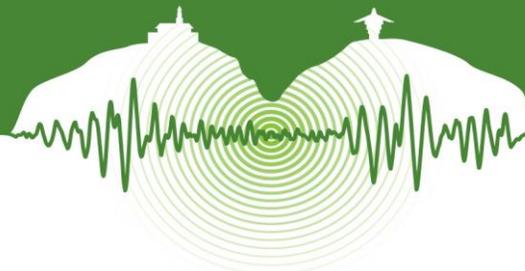
$$v(a) = \sum_{n=1}^N \int_{M_0}^{M_u} -\frac{\partial \lambda}{\partial M} \Pr(A > a | M, R_i) dM \quad (1)$$

donde 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 sísmica, la contribución de la totalidad del rango de magnitudes. La distancia máxima de integración para el presente estudio se ha establecido en 500 km al tratarse de un análisis nacional.

La ecuación anterior sería exacta si las fuentes sísmicas fuesen puntos cuando en realidad son volúmenes, por lo que los epicentros no sólo pueden ocurrir en los centros de las fuentes sino, con la misma probabilidad, en cualquier punto dentro del volumen correspondiente. Se debe tomar en cuenta esta situación subdividiendo las fuentes sísmicas en triángulos, en cuyo centro de gravedad se considera concentrada la sismicidad del triángulo. La subdivisión se hace recursivamente hasta alcanzar un tamaño de triángulo suficientemente pequeño como para garantizar la precisión en la integración de la ecuación anterior. En cada una de estas subdivisiones dentro de la misma fuente, el valor de la sismicidad por unidad de área es el mismo. Se asume que conocidas la magnitud y la distancia, la intensidad sigue una distribución de probabilidad lognormal, $\Pr(A > a | M, R_i)$ se calcula entonces de la siguiente manera:

$$\Pr(A > a | M, R_i) = \phi \left(\frac{1}{\sigma_{Lna}} \ln \frac{\text{MED}(A | M, R_i)}{a} \right) \quad (2)$$

Siendo $\phi(\cdot)$ la distribución normal estándar, $\text{MED}(A | M, R_i)$ la mediana de la intensidad dada por la ley de atenuación asociada para un par de magnitud y distancia (M-R) conocido y σ_{Lna} su correspondiente desviación estándar.



La amenaza sísmica se expresa, entonces, en términos de la tasa de excedencia de valores de intensidad sísmica. Como se ha indicado, en este caso la intensidad sísmica, a , se mide para las ordenadas del espectro de respuesta de pseudo-aceleraciones con un 5% de amortiguamiento con respecto al crítico y los periodos naturales de vibración de interés, T .

Para la cuantificación de la amenaza sísmica se ha utilizado el programa de cálculo CRISIS 2014 V1.1 (Ordaz et al., 2014) el cual es mundialmente reconocido y aceptado para este tipo de evaluaciones y de cuyas versiones anteriores se han utilizado anteriormente por el Comité AIS-300 en Colombia.

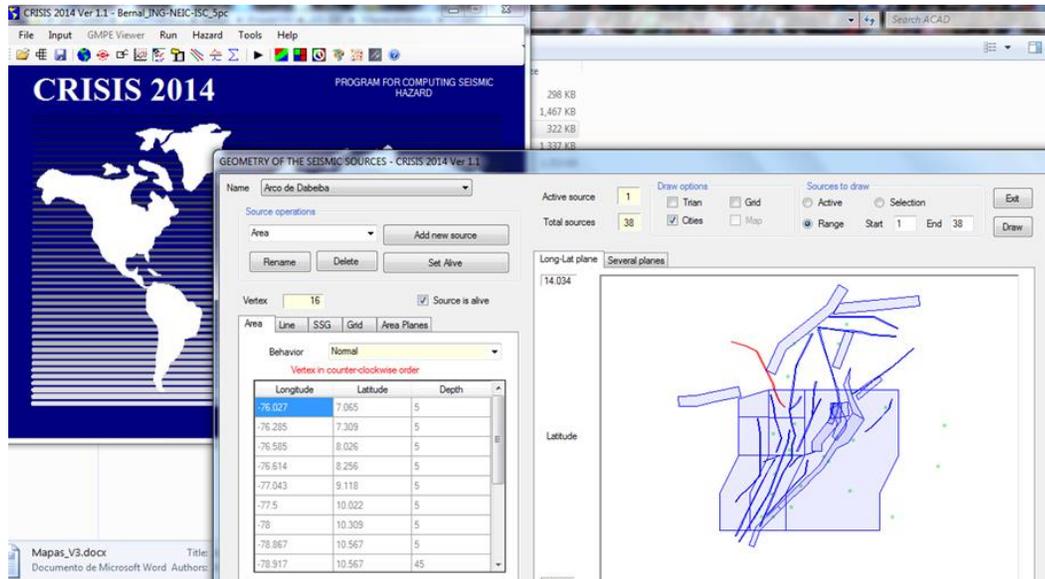


Figura 2: Evaluación de la amenaza sísmica usando el CRISIS 2014 V1.1.

Con los resultados de la evaluación para 975 años de período de retorno promedio y las tres ordenadas espectrales anteriormente mencionadas, se han generado los mapas de zonas de amenaza sísmica para cada uno de los coeficientes sísmicos. Para el coeficiente PGA se han establecido 11 zonas entre 0.05 y 0.55g, para el parámetro S_s se han establecido 14 zonas entre 0.10 y 1.30g mientras que para el parámetro S_1 se han establecido 16 zonas entre 0.05 y 0.75g.

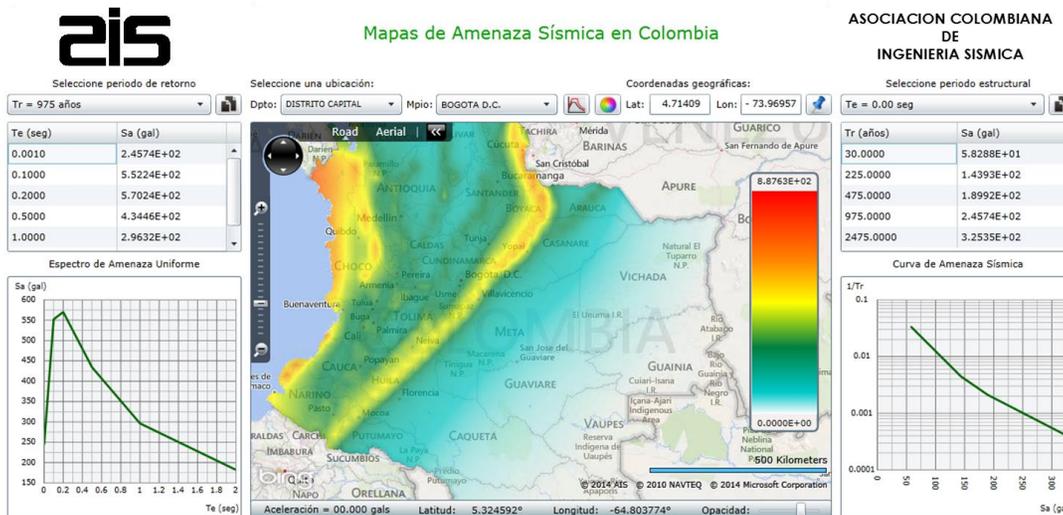
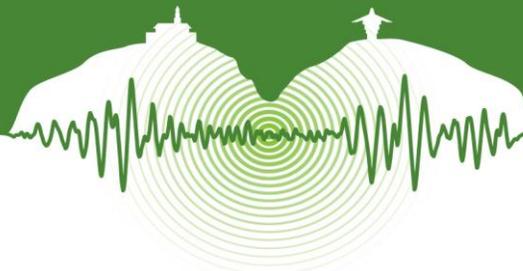


Figura 3: Plataforma de la AIS para obtener los parámetros de la amenaza sísmica del país.



La Figura 3 presenta una imagen de la aplicación Web AIS-2014. Su objetivo principal ha sido poner a disposición de especialistas una herramienta útil que les permita difundir y consultar datos de amenaza sísmica y, calcular espectros de diseño sísmico para distintos reglamentos de construcción vigente en Colombia (AIS-180, CCP y NSR-10). Identificando el lugar, municipio o las coordenadas geográficas de la ubicación del puente o del edificio es posible determinar los valores de los espectros y de los coeficientes sísmicos con los cuales se puede diseñar (Leonardo-Suárez 2014). Esta plataforma Web facilita el procedimiento establecido en las normas y está disponible en el siguiente URL de la AIS: <http://201.244.179.21:8000/AIS-2014/AIS.html>

CONCLUSIONES

La amenaza sísmica de Colombia ha sido actualizada por el Comité AIS-300 para las Normas NSR-10, tanto para los requisitos establecidos en el Título A como para el uso de requisitos internacionales utilizando el documento AIS-180 (según lo establecido en las disposiciones del ASCE 07). Igualmente para efectos del Código Colombiano de Puentes, la amenaza sísmica ha sido definida teniendo en cuenta las particularidades para este tipo de estructuras e incluyendo nuevos datos y avances de la sismología y la ingeniería sísmica y estructural.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó en el marco del proyecto mediante el cual las Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS, llevó a cabo la actualización del Código Colombiano de Puentes con el apoyo financiero del Instituto de Nacional de Vías, INVIAS, y el Ministerio de Transporte.

REFERENCIAS

- AIS. 2010. *Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia*. Comité AIS-300.
- AIS. 2010. *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente, NSR-10*. Comité AIS-100.
- AIS. 2013. *Determinación de las Fuerzas Sísmicas de Diseño de Acuerdo con ASCE 7-10*, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Bogotá D.C., Colombia. Apéndice A (en proceso de revisión)
- AIS. 2014. *Código Colombiano de Puentes*. Comité AIS-200.
- Bernal, G.A., Ordaz, M.G., Salgado, M.A., Cardona, O.D., y Barbat, A.H. 2015. Procedimiento numérico para la calibración de un modelo de espectro de fuente para la obtención de funciones de atenuación y su aplicación en Colombia. Memorias del VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS, Universidad de los Andes, Bogotá.
- Ordaz, M., Martinelli, F., Aguilar, A., Arboleda, J., Meletti, C., and D'Amico, V. 2014. CRISIS 2014 V1.2. Program for computing seismic hazard. Insitituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Salgado-Gálvez, M.A., Bernal, G., Yamín, L., y Cardona, O. 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* N° 32, pp. 28-37.
- Leonardo-Suárez, M. 2014. AIS-2014: Aplicación web para consulta y disseminación de datos de amenaza sísmica y el cálculo de espectros de diseño sísmico en Colombia. AIS, UNAM.