

Dificultades en los estudios probabilísticos de amenaza en Colombia debido a la escasez de datos instrumentales

Difficulties in Seismic Hazard in Colombia Due to the Scarcity of Instrumental Data

ANDRÉS JOSÉ ALFARO CASTILLO*

RESUMEN

Este artículo presenta una evaluación probabilística de la amenaza sísmica en Colombia, utilizando datos que comprenden el periodo de 1960 a 2010, en el área entre las longitudes 80°W a 70°W y las latitudes -1°N a 15°N, se evaluaron leyes de recurrencia y curvas de amenaza sísmica en áreas de 2° por 2°. Al realizar las curvas de recurrencia se encontraron cuadrantes en los que no hay datos suficientes para tener un resultado ligeramente aceptable. Después se desarrollaron las curvas de amenaza sísmica al emplear las ecuaciones de atenuación de Fukushima y Tanaka (1990). Finalmente se desarrolló un mapa de curvas de isoaceleración para el territorio colombiano, en el cual se observa que hay zonas a las que desde el punto de vista probabilístico no se les puede asignar ningún valor. Las evaluaciones se realizaron mediante algoritmos desarrollados por el autor. Las aceleraciones pico en roca, estimadas para un periodo de retorno de 475 años, varían de 438 gals en la costa del Pacífico, tanto en el nido de Urabá, como en la frontera con Ecuador, a 270 gals en la zona del Magdalena medio. No hay un consenso para la asignación de niveles de amenaza en zonas propensas a actividad sísmica, con eventos históricos catastróficos, pero con escasez de datos históricos e instrumentales. El reciente evento en Haití (2010) es uno de los ejemplos de zonas en las cuales hay antecedentes históricos importantes, aunque la información sismológica instrumental sea insuficiente.

Palabras clave: amenaza sísmica, PSHA, Colombia, escasez, completitud, Urabá.

ABSTRACT

This paper presents a probabilistic assessment of seismic hazard in Colombia, using data covering the period from 1960 to 2010 in the area between longitudes 80° W to 70° W and latitudes -1° N to 15° N. Recurrence laws and seismic hazard curves in areas of 2° by 2° were evaluated. In making the recurrence curves, quadrants in which there are insufficient data to have a slightly acceptable result were found. The seismic hazard curves were subsequently developed by using the Fukushima and Tanaka attenuation equations (1990). Finally an iso-acceleration curve map was developed for Colombia, which shows that there are areas for which no value can be assigned from the probabilistic point of view. Evaluations were performed using algorithms developed by the author. Peak accelerations on rock, estimated for a return period of 475 years, range from 438 gals in the Pacific coast, in the swarn of Uraba, and at the border with Ecuador, to 270 gals in the Middle Magdalena. There is no consensus for assigning threat levels in areas prone to seismic activity with catastrophic historical events but limited historical and instrumental data. Recent events in Haiti (2010) is one example of areas where there is important historical background, although the instrumental seismological information is insufficient.

Keywords: Seismic hazard, PSH, Colombia, scarcity, completeness, Uraba.

FECHA DE ENVÍO: 28 DE AGOSTO DE 2011 • FECHA DE ACEPTACIÓN: 23 DE NOVIEMBRE DE 2011

*Ingeniero Civil de la Pontificia Universidad Javeriana, máster en Ingeniería Sísmica de la Universidad Politécnica de Cataluña, especialista en Sismología del International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, de Tsukuba, Japón; investigador del CIEES. Correo electrónico: alfaroc@ciees.org

Introducción

Colombia está situada en una zona propensa a los sismos (Ramírez, 1933, 1971 y 1975; Salcedo, 1992), con una compleja tectónica debido a la interacción de cuatro placas: Suramérica, Caribe, Nazca y Cocos que han formado el relieve del territorio. La dinámica ha generado alrededor de cien estructuras volcánicas, con un buen número de volcanes activos.

Este artículo presenta una evaluación probabilística de la amenaza sísmica del territorio colombiano, esto al emplear metodologías de amenaza y ecuaciones de atenuación robustas, como son Hanks y Cornell (1994) y Fukushima y Tanaka (1990) respectivamente. Para evaluar aceleraciones pico en roca se utilizaron datos instrumentales de 1960 a 2010, se analizaron sismos en el área entre latitudes -1°N a 15°N y entre longitudes -80°W y -70°W , con profundidades menores a 100 km y magnitudes M_S mayores a 3,5.

De acuerdo con Canas et ál. (1996), los datos de los sismos ocurridos en una región son la base indispensable para hacer la evaluación de las probabilidades de ocurrencia. Un catálogo sísmico en perfectas condiciones debería cumplir los siguientes requisitos:

- Completitud y extensión, es decir, debería contener todos los sismos generados en la zona y durante un periodo largo de tiempo.
- Localización precisa de epicentros e hipocentros.
- Fecha y hora del suceso.
- Información exhaustiva; debería constar la aceleración máxima, la magnitud, la frecuencia dominante, la intensidad y el mecanismo focal de cada sismo.
- Relaciones con otros sismos: precursoros y réplicas.
- Curvas isosistas de cada sismo.

Según Canas et ál. (1996) y con la experiencia, las condiciones óptimas son poco realistas. Los catálogos sísmicos se basan en datos instrumentales desde comienzos del siglo XX —en Colombia desde 1922 (Goberna, 1988)—, por lo que no es

posible tener datos como el mecanismo focal, la aceleración máxima y la frecuencia dominante de los sismos anteriores al siglo XX, pero este tipo de datos son, aun en la actualidad, difíciles de obtener debido a la escasez o mala calidad de los registros sísmicos instrumentales. Incluso parámetros sísmicos de sencilla obtención como la magnitud o la localización de hipocentro escasean o son imprecisos en muchas regiones, en este estudio se analizaron 11,881 sismos de los cuales solo 720 contaban con mecanismo focal, es decir, el 6 % del total.

Incluso en el caso de disponer de un catálogo con información instrumental completa, se plantea un problema de extensión temporal del sismo. Los grandes sismos se presentan a intervalos de tiempo relativamente grandes, respecto a los aproximadamente 110 años de registro instrumental: en general no será posible medir con cierta confiabilidad periodos de retorno de más de veinte años, con el agravante de que estos corresponden, en regiones de sismicidad media a los sismos de interés en cuestiones de riesgo (Canas et ál., 1996). En Colombia la primera estación se instaló en 1922 en el Colegio Mayor de San Bartolomé; luego en 1941 se estableció el Instituto Geofísico de los Andes Colombianos, el cual reportaba al USGS y al ISC hasta el 2001; por otro lado, la Red Sísmica Nacional de Colombia se estableció en 1993. Este grave problema de falta de datos ha sido resaltado con los megasismos de Sumatra (2004) y Tohoku-Japón (2011) como lo han expuesto Stein y Okal (2011) y Stein et ál. (2011).

Estudios previos

A nivel de amenaza sísmica para todo el territorio colombiano se han realizado, entre otros, los estudios de Estrada y Ramírez (1977); de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) (1984); Salcedo (1992, 1993); AIS (1996); Ceresis (Castaño y Millán, 1996); Aguiar y Haro (2000); Gallego (2000) y AIS (2009), en los cuales Estrada y Ramírez (1974) y Salcedo (1992) presentan valores de magnitudes esperadas, en tanto que los restantes presentan aceleraciones pico esperadas y espectros de diseño.

Los estudios de AIS (1984, 1996) se sustentaron en modelos de línea fuente, asignándole a ciertas fallas una sismicidad en un corredor de 60 km de ancho, de esta manera se caracterizaron las fuentes sismogénicas. En el caso de AIS (1984) se analizaron tres ventanas de tiempo, a saber: 1566-1984; 1922-1984 y 1957-1984, determinando los parámetros de recurrencia para cada falla.

Dicha caracterización presenta un inconveniente debido a la gran escasez de datos, por ejemplo la falla de Boconó se caracterizó con nueve sismos, la Bolívar con cuatro; la Bucaramanga-Santa Marta con veintitrés, Cauca con seis; Cimitarra con seis; Cuiza con cuatro; Espíritu Santo con seis; Frontal de la Cordillera Oriental con solo veintidós; Nátaga con cinco; Oca con cuatro; Palestina con cinco; Romeral con nueve; Salinas con cuatro y Sinú con tres. Por su parte Felzer (2006) dice que se requieren más de 2000 sismos de buena calidad para caracterizar una fuente. El otro gran inconveniente es que solo consideran fuentes en el territorio colombiano, obviando las fuentes localizadas en Panamá, Venezuela, Ecuador y Perú, todas ellas bastante activas.

El estudio de Salcedo (1992, 1993) tiene como ventaja el que incluye otros parámetros geofísicos y no se limita a los sismos registrados. Dichos parámetros son los siguientes: tipo de corteza terrestre (continental, oceánica o de transición); fallas geológicas según su morfología y cinemática (inversas, normales, transcurrentes); módulo del gradiente de las anomalías de Bouguer; anomalía de la gravedad en la reducción de Bouguer y valores de la altura de la superficie terrestre, este parámetro incluye la información generalizada sobre las deformaciones de la parte superficial de la corteza terrestre.

El mapa de Salcedo (1992, 1993) muestra que los posibles sismos más fuertes con $M_{max} > 7,5$ se esperarían en la región del Chocó. Valores de la $M_{max} > 7,0$ se esperarían al Este de la zona del Chocó en la cordillera occidental, en la región de Nariño y en la zona Norte de la Sierra Nevada de Santa Marta. Además, con el valor $M_{max} > 6,0$ Salcedo (1993) lo toma como el nivel de fondo de sismicidad fuerte a largo plazo en todo el territorio de Colombia. Sin embargo, el mapa no muestra las altas magnitudes que ya se han presentado en la zona de Tumaco y en la frontera con Ecuador, con magnitudes M_w de hasta 8,6 en 1906. También existe el mapa probabilístico para Suramérica realizado por Ceresis (Castaño y Millán, 1996), cuyos valores son en general mayores a los de la Norma Sismo Resistente (NSR 10).

Al seguir la recomendación de Stein et ál. (2011), de realizar una mirada retrospectiva y comparar el mapa de aceleraciones de pronóstico con las aceleraciones registradas, en el caso de Colombia se presentan básicamente dos problemas: baja instrumentación de movimiento fuerte y otro tal vez más grave, y es que la mayoría de los acelerógrafos están colocados en suelo, sin que tengan estación de referencia en roca, y sabiendo que los mapas de amenaza regional han sido realizados para

la aceleración pico en roca. Los dos sismos fuertes con registros de aceleración mayores a 100 gales han sido el del 25 de enero de 1999 en el eje cafetero y el del 24 de mayo del 2008 en Quetame (Cundinamarca).

El del 25 de enero de 1999 se registraron aceleraciones en suelo de 518 gales a 13 km del epicentro (Sugito y Taniguchi, 1999), por lo que se realizaron estimaciones de la aceleración en roca y se obtuvo el valor de 217 gales. De acuerdo con las observaciones de campo y las fotografías aéreas se puede deducir que se presentaron aceleraciones mayores a una gravedad. A pesar de esto los estudios de AIS (2009) no presentan ningún cambio en el valor de aceleración de la ciudad de Armenia.

En el caso del sismo del 24 de mayo del 2008 se registraron aceleraciones de 605 gales en roca a 9 km del epicentro. El estudio de AIS (1998) asignaba 0,30 g para este sitio, en tanto que el estudio AIS (2009) presenta 0,35 g. Este estudio, como se presenta más adelante, muestra un valor de 0,35 al tener en cuenta que la desviación estándar de la ecuación de Fukushima y Tanaka (1990) es de 0,21, lo cual significaría un valor de 0,56 g; si se tuviera en cuenta la completitud del catálogo el valor sería de 0,64 g, el cual es solo el 3 % diferente del valor registrado. De ahí la importancia de revisar y actualizar los estudios de amenaza sísmica (Correa y Alfaro, 2011; Stein et ál, 2011).

Metodología y análisis de datos¹

En este estudio se siguió la metodología de Hanks y Cornell (1994) y Takada (2005) para la evaluación de las curvas de amenaza. De este modo, conocer los eventos sísmicos de esta área hizo necesario consultar los catálogos del US Geological Survey (USGS) del 2011; con el fin de unificar las escalas de magnitud a Ms, se utilizaron los estudios de Utsu (Lee et ál., 2002). Así, para lo referente a los mecanismos focales se tomaron los resultados del Centroid Moment Tensor Project (Ekström, 2011).

Debido a la escasez de datos sismológicos, en este estudio se utilizaron sismos con magnitud MS mayor a 3.5. En consecuencia, tener menos variables en el análisis, todas las áreas fueron de 2° por 2°; se pudo suponer que la sismicidad es un proceso de *Poisson* en el espacio, dicha suposición subestima el nivel de amenaza en la zona donde termina la cordillera de Los Andes y empieza la Amazonía, esta aparente

¹ Los programas de análisis fueron realizados en Fortran, utilizando el ambiente Cygwin.

baja sismicidad corresponde a la falta de instrumentación, puesto que los estudios geológicos y sismológicos muestran fuentes sismogénicas importantes (Paris et ál., 2000; Montes y Sandoval, 2001).

El método de Hanks y Cornell (1994) también supone que la ocurrencia de los sismos en la región de interés se aproxima a un proceso de *Poisson* con una tasa constante de sismos en el tiempo. En este análisis se tomó un periodo de tiempo entre 1960 y 2010. Es importante anotar que el catálogo sísmico no fue completado debido a que la cantidad de datos es baja y la sismicidad es heterogénea como se observa en la figura 1. Por otro lado, las leyes de recurrencia corresponden a la evaluación clásica de Gutenberg-Richter (1942, 1956) (figura 2).

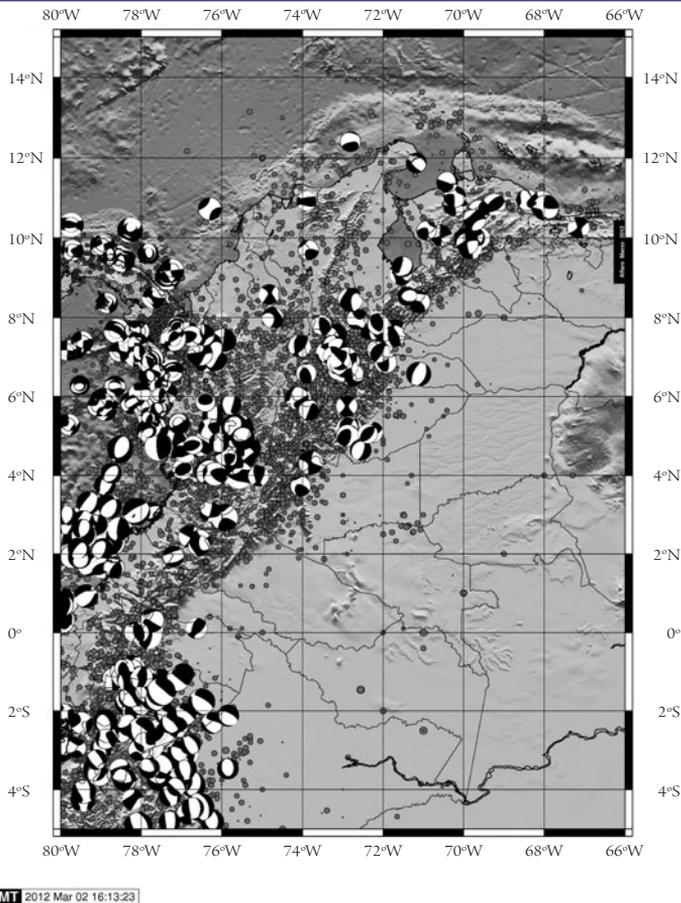


Figura 1. Sismicidad en Colombia hasta el 2011. Mecanismos focales del proyecto CMT (Ekström, 2011)

Fuente: elaboración propia a través del software GMT (Wessel y Smith, 2004).

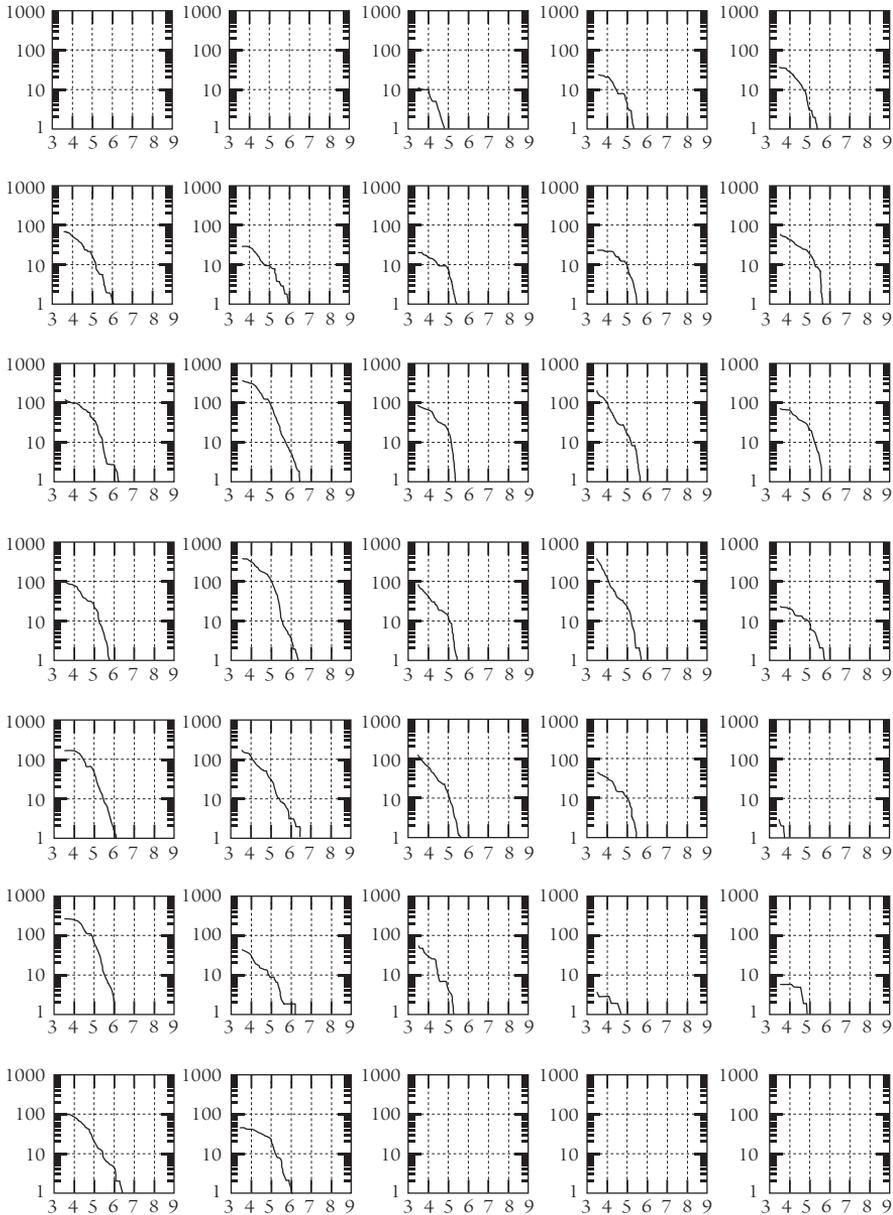


Figura 2. Leyes de recurrencia para Colombia

Periodo entre 1960 y 2010. Profundidad menor de 100 km. Magnitud M_S mayor o igual a 3,5. De $1^\circ S$ a $13^\circ N$ y de $80^\circ W$ a $70^\circ W$. En las abscisas magnitud M_S , en las ordenadas número acumulado de eventos

Fuente: elaboración propia a través del software Gnuplot (Williams y Kelley, 2007).

No obstante, en la tabla 1 se presenta el número de datos disponibles para cada subzona, con el máximo número de datos en los nidos de Urabá (375 datos) y Bucaramanga (389 datos), cantidad que no deja de ser baja para caracterizar una fuente sismogénica. De acuerdo con Felzer (2006) se requieren más de 2000 sismos de buena calidad para obtener un error menor al 0,05 con una confiabilidad del 98 %.

Tabla 1. Número de sismos en cada cuadrante

		LONGITUD									
		- 80°	- 78°	- 76°	- 74°	- 72°	- 70°				
LATITUD	15°										
		0	0	2	4	7					
	13°										
		0	0	11	23	36					
	11°										
		73	31	21	24	61					
	9°										
		124	371	91	217	74					
	7°										
		89	375	83	389	23					
	5°										
		161	168	121	45	3					
	3°										
		275	46	58	4	6					
1°											
	95	42	1	0	1						
- 1°											

Periodo de tiempo: 1960-2010. Profundidad menor de 100 km. Magnitud MS mayor o igual a 3,5. En los cuadrantes resaltados se evaluaron las curvas de amenaza

Se puede observar que la zona de la costa Caribe presenta una escasez de datos instrumentales, a pesar de que hay evidencia histórica de sismos destructores como los del 26 de febrero de 1825 y el del 22 de mayo de 1834, entre otros, que generaron daños importantes en Santa Marta y sus alrededores (Ramírez, 1975). Caso

similar al de Haití con sismos históricos devastadores pero de baja información instrumental (Alfaro y Van Hissenhoven, 2010).

Para la determinación de las aceleraciones para cada magnitud de sismo es necesario estimar la atenuación de la aceleración con la distancia. Se han desarrollado múltiples ecuaciones en todo el mundo. Douglas (2001, 2002) recopiló más de doscientas ecuaciones robustas determinadas en diferentes partes del mundo. En este estudio se utilizó la ecuación de Fukushima y Tanaka (1990), como se puede observar en la ecuación 1, que cumple varios criterios: ser relativamente reciente, que para su desarrollo se utilizó una gran base de datos, que la magnitud estuviera expresada en M_S y que fuera robusta.

$$\text{Log } a = 0,41 M_S - \log (R + 0,032 \times 10^{0,41M_S}) - 0,0034 R + 1,30 \quad (1)$$

Donde:

a = aceleración en gales

Desviación Estándar = $\sigma = 0,21$

R = distancia epicentral en kilómetros

M_S = magnitud de ondas superficiales

Para determinar la curva de amenaza sísmica se procedió a combinar la tasa anual de ocurrencia de sismos con una magnitud dada por la unidad de área. Finalmente, el total de la tasa media anual de ocurrencia del movimiento sísmico es mayor que una aceleración a dada, la cual es la sumatoria de las contribuciones de las diferentes magnitudes.

Los resultados se presentan en función del tiempo de retorno. Para labores de diseño estructural comúnmente se utiliza 475 años. El cual corresponde a una vida útil de la estructura de cincuenta años y a una probabilidad de excedencia del 10 %. Las curvas de amenaza se pueden observar en la figura 3.

La figura 4 muestra los valores de isoaceleración para un periodo de retorno de 475 años. Hay zonas a las que, desde el punto de vista probabilístico, no se les puede asignar ningún valor, dado que el número de datos es demasiado bajo, bastante menor de un evento por año.

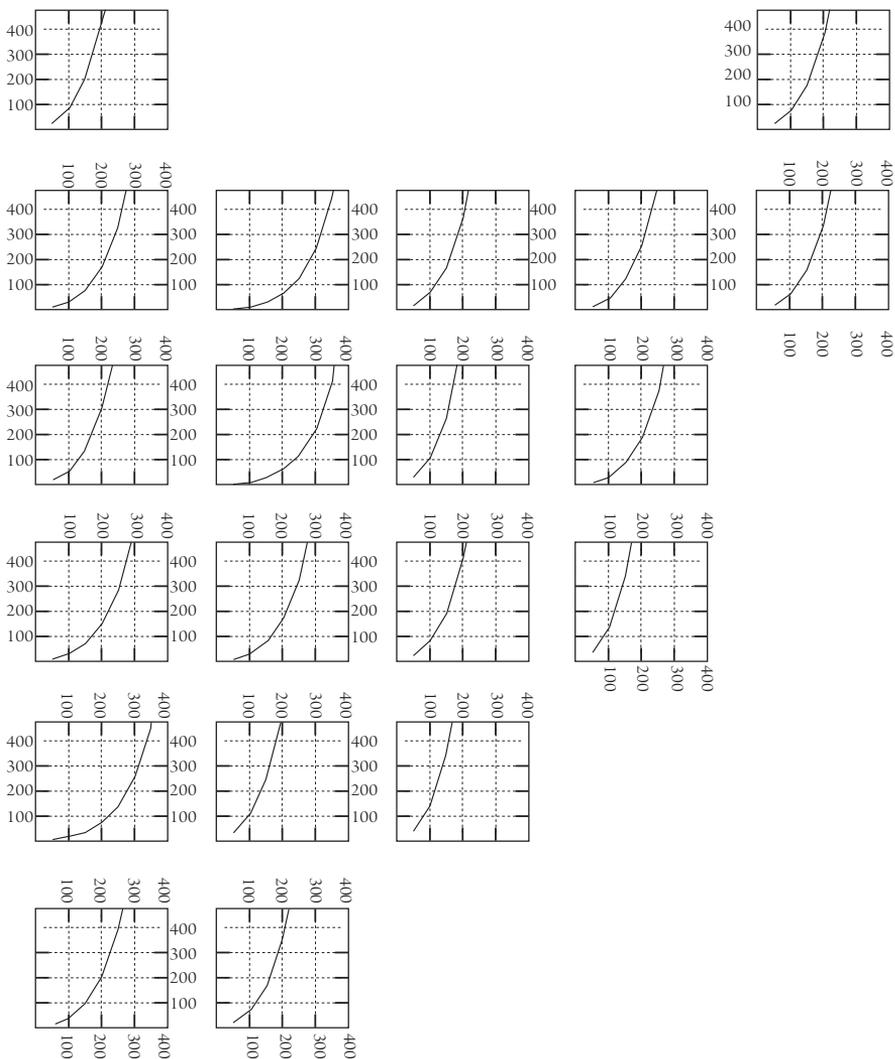


Figura 3. Curvas de amenaza sísmica para Colombia

Periodo entre 1960 y 2010. Profundidad menor de 100 km. Magnitud M_S mayor o igual a 3,5. De $1^\circ S$ a $11^\circ N$ y de $80^\circ W$ a $70^\circ W$. En las abscisas aceleración en gales, en las ordenadas período de retorno en años

Fuente: elaboración propia a través del software Gnuplot (Williams y Kelley, 2007).

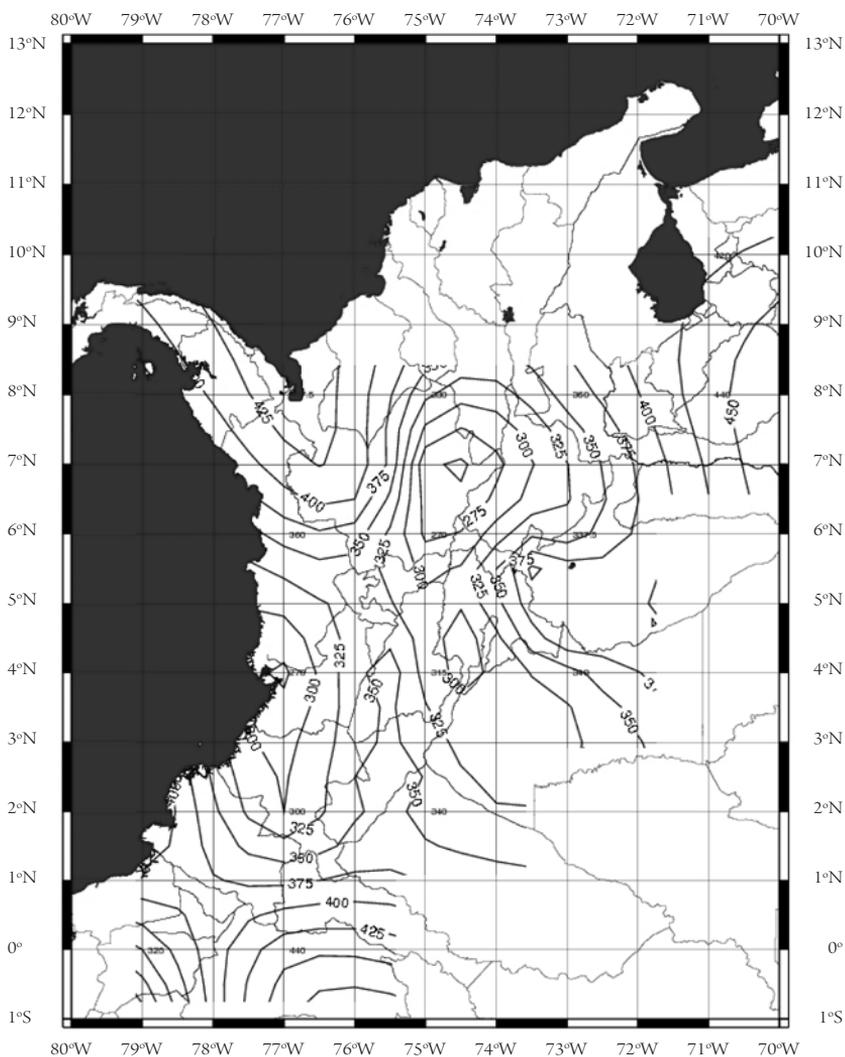


Figura 4. Curvas de isoaceleración para Colombia

Periodo entre 1960 y 2010. Profundidad menor de 100 km. Magnitud M_S mayor o igual a 3,5

Fuente: elaboración propia a través del software GMT (Wessel y Smith, 2004).

Discusión y conclusiones

Desde los años setenta se han elaborado en Colombia varios mapas de amenaza sísmica con diferentes aproximaciones, como los de Estrada y Ramírez (1977); AIS (1984, 1996 y 2009); Salcedo (1992 y 1993); Ceresis (1996) y Gallego (2000), todos ellos con sus fortalezas y debilidades. A la luz de eventos catastróficos recientes, como el sismo de Haití de 2010, y el sismo de Tohoku (Japón) de 2011 y atendiendo la sugerencia de Stein et ál. (2011) de realizar una mirada retrospectiva y objetiva a los pronósticos, resulta importante ver cómo la norma sismorresistente vigente pareciera hacer caso omiso de las evidencias instrumentales e históricas.

La aproximación probabilista de la amenaza presenta limitaciones en Colombia, principalmente por escasez de datos, como se muestra en este estudio, en el cual se analizaron los cuadrantes de 2° por 2° en el área comprendida entre las longitudes 80°W y 70°W y entre las latitudes 1°S y 15°N , que corresponden al territorio colombiano. Los datos analizados fueron de 1960 al 2010, ya que presentan una distribución temporal aproximadamente de tipo *Poisson*. Los sismos corresponden a profundidades menores de 100 km y magnitudes M_s mayores a 3,5. La unificación de escalas de magnitud se realizó con los estudios de Utsu (Lee et ál., 2002). Las aceleraciones pico en roca, para un periodo de retorno de 475 años varían de 438 gales en la costa del Pacífico colombiano, tanto en el nido de Urabá, como en la frontera con Ecuador, a 270 gales en la zona del Magdalena medio.

Debido a la escasez de datos, los valores en el piedemonte llanero se suponen poco realistas, ya que subestiman los grados de amenaza. Adicionalmente hay un vacío de información en los departamentos de la costa Caribe. Los dos sismos fuertes con registros de aceleración mayores a 100 gales han sido los del 25 de enero de 1999 en el eje cafetero y el del 24 de mayo del 2008 en Quetame (Cundinamarca).

En el del 25 de enero de 1999 se registraron aceleraciones en suelo de 518 gales, a 13 km del epicentro. Sugito y Taniguchi (1999) realizaron estimaciones de la aceleración en roca y obtuvieron el valor de 217 gales. De acuerdo con las observaciones de campo y las fotografías aéreas se puede deducir que se presentaron aceleraciones mayores a una gravedad. A pesar de esto, los estudios de AIS (2009) no presentan ningún cambio en el valor de aceleración de la ciudad de Armenia.

En el caso del sismo del 24 de mayo del 2008 se registraron aceleraciones de 605 gales en roca a 9 km del epicentro. El estudio de AIS (1998) asignaba 0,30 g para este sitio, en tanto que el estudio AIS (2009) presenta 0,25 g. Este estudio presenta un valor de 0,35 g, teniendo en cuenta que la desviación estándar de la ecuación de Fukushima y Tanaka (1990) es de 0,21 g, lo cual significaría un valor de 0,56 g; si se tuviera en cuenta completitud del catálogo el valor sería de 0,64 g, el cual es solo el 3 % diferente del valor registrado. De ahí la importancia de revisar y actualizar los estudios de amenaza sísmica (Correa y Alfaro, 2011; Stein et ál., 2011).

Debe haber una conciencia de las limitaciones en los estudios existentes y complementar estos con información de tipo geológico y geofísico para llenar los vacíos con información determinista (Paris et ál., 2000; Montes y Sandoval, 2001). Sin olvidar los antecedentes de los tsunamis que ocurrieron en el siglo XX en la costa Pacífica colombiana. Los mapas que rigen la norma sismorresistente deben responder al contexto geológico, geomorfológico e histórico y ser coherentes con los eventos del pasado, el pronóstico debe ser revisado con los eventos ocurridos.

Referencias

- Aguiar, R. y Haro, A. (2000). Zonificación sísmica en países bolivarianos. *Boletín Técnico IMME*, 38(3), 27-41.
- Alfaro, A. y Van Hissenhoven, R. (enero-junio del 2010). Sismo de Haití: aspectos sismológicos. *Revista Épsilon*, 14, 113-120.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (1984). *Estudio general del riesgo sísmico de Colombia*. Bogotá.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (1996). *Estudio general de amenaza sísmica de Colombia*. Bogotá.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2009). *Estudio general de amenaza sísmica de Colombia*. Bogotá.
- Canas, J. A.; Egozcue, J. M.; Canet y Barbat, A.H. (1996). *Modelización de la peligrosidad sísmica - aplicación a Cataluña* [Monografía CIMNE IS-21]. Barcelona.
- Castaño, J. y Millán, M. (Comps.) (1996). *Mapa probabilístico de peligro sísmico en Sudamérica*. Ceresis
- Correa, M. y Alfaro, A. (2011). Necesidad de la revisión de los estudios de amenaza sísmica a raíz del sismo de Tohoku del 2011. *Revista Tecnura*, 15(30), 82-92.

- Douglas, J. A. (2001). *Comprehensive Worldwide Summary of Strong-Motion Attenuation Relationships for Peak Ground Acceleration and Spectral Ordinates (1969 to 2000)*. Londres: Imperial College of Science, Technology and Medicine.
- Douglas, J. A. (2002). *Errata and additions to ESEE Report No. 01-1: A comprehensive worldwide for peak ground acceleration and spectral ordinates (1969 to 2000)*. Londres: Imperial College of Science Technology and Medicine.
- Ekström, G. (2011). *Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project*. Recuperado de <http://www.globalcmt.org/>
- Estrada, G. y Ramírez, J. E. (1977). *Mapa de riesgo sísmico para Colombia*. Bogotá: Instituto Geofísico de los Andes Colombianos - Pontificia Universidad Javeriana.
- Felzer, K. (2006). *Calculating the Gutenberg-Richter b value*. Proceedings of American Geophysical Union Meeting.
- Fukushima, Y. y Tanaka, T. (1990). A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(4), 757-783.
- Gallego, M. (2000). *Estimación del riesgo sísmico en la República de Colombia* [tesis de maestría]. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Goberna, J. R. (1988). *The Historical Seismograms of Colombia en Historical Seismograms of the World*. San Diego: W.H.K. Lee; H. Meyers & K. Shimazaki. Academic Press, Inc.
- Gutenberg, B. y Richter, C. (1942). Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration. *Bull. Seism. Soc. Am*, 32,163-191.
- Gutenberg, B. y Richter, C. (1956). Magnitude and Energy of Earthquake. *Annali di Geofisica*, 9, 1-15.
- Hanks, T.C. y Cornell, C.A. (1994). Probabilistic Seismic Hazard Analysis: A Beginner's Guide. En *Proceedings of the Fifth Symposium on Current Issues Related to Nuclear Power Plant Structures, Equipment and Piping*. Carolina del Norte: North Carolina State University, Raleigh.
- Lee, W. H. K.; Kanamori H. y Kisslinges, C. (2002). *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*. International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior Committee on Education, International Association for Earthquake Engineering, Academic Press.
- Montes, N. y Sandoval, A. (2001). *Base de datos de fallas activas de Colombia - Recopilación Bibliográfica*. Bogotá: Ingeominas.
- Paris, G.; Machette, M.; Dart, R. y Haller, K. (2000). *Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions*. USGS.
- Ramírez, J. E. (1933). Earthquake history of Colombia. *Bull. Seism. Soc. Am*, 23, 13-22.

- Ramírez, J. E. (1971). The destruction of Bahía Solano, Colombia, on September 26, 1970 and the rejuvenation of a fault. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 61. 1041-1049.
- Ramírez, J. E. (1975). *Historia de los terremotos en Colombia*. Bogotá: IGAC.
- Salcedo, E. (1992). *Sismicidad y amenaza sísmica en Colombia* [PhD tesis de Física]. Moscú: Universidad Estatal Lomonosov.
- Salcedo, E. (1993). "Mapa de Mm del territorio de Colombia". En *Memorias del Curso Construcción e Interventoría de la Mampostería Estructural de Colombia*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Stein, S. y Okal, E. (2011). The Size of the 2011 Tohoku Earthquake Need Not Have Been a Surprise. *EOS*, 92(27), 227-228.
- Stein S.; Geller, R. y Liu, M. (2011). Bad Assumptions or Bad Luck: Why Earthquake Hazard Maps Need Objective testing. *Seismological Research Letters*, 82(5), 623-626.
- Sugito, M. y Taniguchi, H. (1999). *Simulation of strong ground motion for the Quindío earthquake*. Reconnaissance Report on the 1999 Quindío, Central Western Colombia, Earthquake and its Disasters. Hiroshi Kagami, Graduate School of Engineering, Hokkaido University.
- Takada, T. (2005). Seismic Macro Zonation. En *International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Lectures Notes*.
- United States Geological Survey (USGS) (2011). Disponible en http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_rect.html
- Utsu, T. (2002). "Relationships between magnitude scales" En *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior Committee on Education, International Association for Earthquake Engineering*, W.H.K. Lee, H Kanamori y C. Kisslinger Editors, Academic Press, 733-746.
- Wessel, P. y Smith, W. (2004). *The Generic Mapping Tools Version 4 - Technical Reference and Cookbook*. Recuperado de <http://gmt.soest.hawaii.edu>
- Williams, Th. y Kelley, C. (2007). *Gnuplot - An Interactive Plotting Program*. Recuperado de <https://www.gnuplot.info>

